

**UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID**  
**ESCUELA POLITECNICA SUPERIOR**  
**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**



**TRABAJO FIN DE GRADO**

Grado en Ingeniería Eléctrica

**PROTECCIONES ELÉCTRICAS EN DIGSILENT  
POWERFACTORY:**

**MODELOS DE FABRICANTES ESPAÑOLES (II)**

**AUTOR:** Antonio Recas Meirinho

**TUTOR:** Ana Belén Morales Martínez

Leganés, 2 de mayo de 2012



## ÍNDICE

RESUMEN DEL PROYECTO .....	5
AGRADECIMIENTOS.....	6
INTRODUCCIÓN.....	7
1. TIPOS DE RELÉS .....	8
2. TRANSFORMADORES PARA MEDIDA .....	8
2.1. Transformadores de tensión .....	9
2.2. Transformadores de intensidad .....	9
3. CUALIDADES DE UN SISTEMA DE PROTECCIÓN .....	9
ALCANCE Y OBJETIVO DEL PROYECTO .....	10
RELÉS IMPLEMENTADOS.....	10
1. RELÉ IDN .....	11
2. RELÉ IDV .....	12
INTRODUCCIÓN A POWERFACTORY .....	13
1. Tipos de bloques empleados.....	13
2. Construcción de una función .....	15
3. Área de trabajo.....	18
FUNCIONES IMPLEMENTADAS EN POWERFACTORY .....	19
1. PROTECCIÓN DE FRECUENCIA.....	19
2. PROTECCIÓN DE TENSIÓN.....	21
3. PROTECCIÓN DE SOBREINTENSIDAD.....	23
3.1. Protecciones de sobreintensidad instantánea.....	23
3.2. Protecciones de sobreintensidad temporizada.....	27
4. PROTECCIÓN DIFERENCIAL.....	30
4.1. Protección diferencial con frenado.....	31
4.1.1. Frenado por armónicos .....	33
4.1.2. Bloqueo por armónicos .....	33
4.2. Protección diferencial instantánea.....	34
5. PROTECCIÓN DE FALTAS A TIERRA RESTRINGIDAS .....	35
6. PROTECCIÓN DE FALLO DE INTERRUPTOR .....	36
7. PROTECCIÓN DE SOBREEXCITACIÓN .....	37
8. PROTECCIÓN DE DISTANCIA .....	38



8.1. Detector de fallo de fusible .....	40
8.2. Detector de oscilación de potencia.....	41
9. REENCHADOR .....	41
10. UNIDAD DE CARGA FRÍA .....	42
ENSAYO DE FUNCIONES .....	43
1. TRANSFORMADORES DE INTENSIDAD PARA MEDIDA.....	45
1.1. Transformador trifásico.....	45
1.2. Transformador monofásico .....	45
2. TRANSFORMADOR DE TENSIÓN PARA MEDIDA .....	45
3. ENSAYO DE UNIDADES DE FRECUENCIA.....	46
3.1. Ensayo de subfrecuencia o mínima frecuencia .....	46
3.2. Ensayo de sobrefrecuencia o máxima frecuencia .....	47
3.3. Ensayo de rampa de frecuencia o derivada de frecuencia.....	48
3.4. Bloqueo de unidades de frecuencia por mínima tensión.....	49
4. ENSAYO DE UNIDADES DE TENSIÓN.....	51
4.1. Ensayo de subtensión .....	51
4.2. Ensayo de sobretensión .....	52
4.3. Ensayo sobretensión de neutro calculado.....	53
5. ENSAYO DE UNIDADES DE SOBREINTENSIDAD.....	54
5.1. Ensayo de unidades de sobreintensidad instantánea .....	54
5.1.1. Unidades de sobreintensidad instantáneas de fase .....	54
5.1.2. Unidades de sobreintensidad instantáneas de secuencia inversa .....	55
5.1.3. Unidades de sobreintensidad instantánea de neutro calculado.....	56
5.1.3.1. Disparo hacia delante. ....	56
5.1.4. Unidades de sobreintensidad instantánea de puesta a tierra.....	57
5.1.5. Unidades de neutro sensible.....	58
5.2. Ensayo de unidades de sobreintensidad temporizada .....	59
5.2.1. Unidades de sobreintensidad temporizada de fase .....	59
5.2.2. Unidades de imagen térmica .....	61
5.2.3. Unidades de sobreintensidad temporizada de secuencia inversa .....	63
5.2.4. Unidades de sobreintensidad temporizada de neutro calculado.....	64
5.2.5. Unidades de sobreintensidad temporizadas de puesta a tierra .....	65



5.2.6. Unidades de sobreintensidad temporizadas de puesta a tierra .....	66
6. ENSAYO DE LA UNIDAD DIFERENCIAL .....	67
6.1. Ensayo de bloqueo por armónicos .....	68
7. ENSAYO DE LA UNIDAD DE FALTAS A TIERRA RESTRINGIDAS .....	70
8. ENSAYO DE LA UNIDAD DE FALLO DE INTERRUPTOR .....	71
9. ENSAYO DE LA UNIDAD DE SOBREEXCITACIÓN .....	72
10. ENSAYO DE LA UNIDAD DE DISTANCIA.....	73
10.1. Ensayo de característica MHO .....	73
10.1.1. Falta en zona uno.....	74
10.1.2. Falta en zona dos .....	75
10.2. Ensayo de característica cuadrilateral.....	75
10.2.1. Falta en zona uno.....	76
10.2.2. Ensayo en zona dos .....	77
11. Unidad de fallo de fusible.....	77
TRABAJO EN STATIONWARE.....	79
1. Exportar ajustes a StationWare.....	81
2. Importar ajustes desde StationWare .....	82
PRESUPUESTO.....	83
CONCLUSIONES.....	85
ANEXOS .....	86
1. Anexo I (Esquema del relé IDV E) .....	86
2. Anexo II (Esquema del relé IDN G).....	86
3. Anexo III (Presupuesto del proyecto).....	86
OBTENCIÓN DE LA INFORMACIÓN .....	87
BIBLIOGRAFÍA Y OTRAS FUENTES DOCUMENTALES.....	88



## RESUMEN DEL PROYECTO

El objetivo de este proyecto ha sido llevar a cabo la incorporación de dos relés del fabricante español ZIV a la librería del programa PowerFactory, concretamente los relés IDN e IDV.

La principal fuente de información sobre el relé ha sido el manual de instrucciones de la protección, redactado por la propia empresa comercializadora de la protección aunque a lo largo del desarrollo del proyecto ha sido necesario buscar otras fuentes de información alternativas de la propia empresa ZIV.

La realización de este proyecto se puede dividir en dos partes:

- El trabajo realizado con el programa PowerFactory.
- El trabajo realizado con los relés en la aplicación StationWare.

En la primera parte del proyecto se han desarrollado ambos relés en lenguaje DSL (DIgSILENT Simulation Language) de cara a su incorporación en la librería del programa. También se incluye en esta parte del proyecto los ensayos realizados con los relés para comprobar el correcto comportamiento de las diversas funciones implementadas.

Posteriormente, tras el trabajo realizado con el programa PowerFactory, también se decidió implementar los relés en la aplicación StationWare. Esta segunda aplicación es una base de datos que nos permite almacenar los ajustes de cualquier tipo de relé del que dispongamos. Los ajustes almacenados pueden provenir de las simulaciones de PowerFactory o pueden haber sido importados desde el relé real.

Esta segunda parte del proyecto ha consistido en la programación de un conjunto de scripts en lenguaje DPL (DIgSILENT Programming Language), muy similar a C++, para conseguir, tanto exportar los ajustes del relé utilizados en las simulaciones de PowerFactory a la aplicación StationWare, como importar ajustes de StationWare al relé de PowerFactory.



## AGRADECIMIENTOS

La presentación del trabajo de fin de grado es uno de los momentos más especiales de la carrera y por eso me gustaría dar las gracias a aquellas personas que me han acompañado durante todo este tiempo.

En primer lugar me gustaría darle las gracias a mi tutora Ana Morales, por su tiempo dedicado en este proyecto y en su asignatura de protecciones eléctricas. También darle las gracias tanto a ella como a Xavier Robe y la empresa DIgSILENT Ibérica por haberme permitido realizar las prácticas con ellos.

En segundo lugar agradecer a Alejandro Ruiz de la empresa ZIV su ayuda al facilitarnos acceso a la aplicación ZiverComPlus, la cual ha supuesto una fuente de información muy importante a lo largo de este proyecto.

También me gustaría mencionar a mis compañeros y amigos Víctor y Dani, por todos esos buenos momentos pasados durante estos años y a todos mis amigos de siempre por su apoyo.

Igualmente darles las gracias a todos aquellos profesores que durante todos estos años me han enseñado, tanto en la universidad como fuera de ella.

Por último agradecer sobretodo a mis padres y a mi hermana todo el apoyo y por estar siempre ahí, sin ellos no habría sido posible.



## INTRODUCCIÓN

La calidad de suministro en un sistema eléctrico es un aspecto muy importante de cara a evitar grandes pérdidas tanto económicas como sociales. Entre los aspectos mas importantes que afectan a la calidad podemos encontrar:

- La continuidad del suministro: esta continuidad se determina principalmente a partir del número de interrupciones producidas en el sistema y de su duración. Estas interrupciones pueden producirse por averías en los transformadores, líneas, etc. de una red eléctrica.
- La calidad de la forma de onda: existen muchos factores que pueden afectar a la calidad de la onda, como pueden ser los huecos de tensión<sup>1</sup>, el flicker<sup>2</sup>, el contenido de armónicos<sup>3</sup>, etc. Una mala calidad de la onda puede provocar averías en los elementos conectados a la red y por lo tanto influir negativamente en la continuidad del suministro.

Haciendo un análisis más general, las principales perturbaciones<sup>4</sup> que pueden aparecer en una red son:

- Cortocircuitos: conexión accidental entre conductores de distinta fase o entre los conductores y tierra. Pueden ser monofásicos bifásicos, bifásicos a tierra o trifásicos. Provocan una elevación muy importante de la corriente en muy poco tiempo.
- Sobrecargas: se producen cuando se supera los valores nominales de intensidad por exceso de carga.
- Sobre tensiones: incremento de la tensión por encima de la tensión normal de funcionamiento. Puede provocar cortocircuitos, daños en personas y aparatos conectados a la red, etc.
- Sub tensiones: descenso de la tensión por debajo del valor nominal. Puede producir sobrecargas si la potencia demandada es constante.
- Variación de la frecuencia.
- Oscilación de potencia.

Todas estas perturbaciones pueden producir efectos negativos en los elementos de la red pues provocan vibraciones, calentamientos, deterioros del aislamiento, deterioro del circuito magnético de los transformadores, etc.

---

<sup>1</sup> Hueco de tensión: se trata de una disminución de la tensión del sistema a un valor entre el 90% y el 1% de la tensión nominal.

<sup>2</sup> Flicker: fluctuación de la tensión que provoca el parpadeo de las lámparas.

<sup>3</sup> Armónico: onda de tensión o corriente con una frecuencia que es múltiplo de la frecuencia de la red.

<sup>4</sup> Perturbación: alteración no deseada de las condiciones normales de funcionamiento del sistema eléctrico.



Para eliminar o corregir estas perturbaciones es necesario, entre otras medidas, emplear sistemas de protección. Un sistema de protección es un conjunto de relés de protección y equipos complementarios necesarios para eliminar o corregir las perturbaciones que pueden aparecer en el sistema.

Un relé de protección es un dispositivo destinado a vigilar uno o más elementos de la red y en caso de detectar un funcionamiento irregular, debe tomar las medidas oportunas para suprimirlo. El relé mide una magnitud o conjunto de magnitudes y si se superan los valores ajustados emite una señal de disparo que puede ir dirigida a la apertura o no de los interruptores asociados al mismo.

Por su parte, los equipos complementarios necesarios en un sistema de protección pueden ser transformadores de medida (tanto de corriente como de tensión), interruptores automáticos, etc.

Cuando se detecta una perturbación que debe ser eliminada para evitar daños en los elementos de la red, lo más común es realizar una desconexión de dichos elementos afectados. Para garantizar un alto grado de continuidad del suministro y evitar desconexiones innecesarias las protecciones deben actuar siguiendo una serie de criterios como pueden ser la discriminación, la selectividad, la rapidez, etc.

## **1. TIPOS DE RELÉS**

Los relés se pueden clasificar atendiendo a distintos aspectos como puede ser su función (relés de protección, de respaldo, etc.), la magnitud sobre la que operan, según la característica de actuación, etc.

Dentro de los relés de protección, función en la que se centra este proyecto, podemos encontrar las siguientes clasificaciones:

- Según la magnitud sobre la que operan tenemos relés de tensión, de frecuencia, de intensidad, etc.
- Según el principio de funcionamiento podemos encontrar por ejemplo los relés diferenciales.
- Según la característica de actuación tenemos relés de distancia, de sobretensión, de derivada de frecuencia, instantáneos, temporizados, con o sin frenado, etc.

## **2. TRANSFORMADORES PARA MEDIDA**

Para que un relé pueda detectar las perturbaciones presentes, es necesario tener unas magnitudes de entrada que analizar, como son la tensión y corriente que circula por el elemento a proteger (transformadores, líneas, etc.). Estas corrientes y tensiones suelen ser elevadas generalmente, por lo que es necesario emplear transformadores para procesarlas y adecuarlas a unos niveles más manejables. Estos transformadores se denominan transformadores de medida, y su utilización es necesaria ya que manejar





unos niveles elevados de tensión y corriente es innecesario. Niveles elevados de tensión y/o intensidad pueden suponer riesgo para las personas y además aumentan el coste de los relés, pues es necesario emplear un aislamiento de mayor nivel. Es importante señalar que pese al empleo de estos transformadores las faltas ocurridas en el sistema no se desvirtúan, y son igualmente detectables.

## 2.1. Transformadores de tensión

Los transformadores de tensión (denominados TT) reducen la tensión del sistema a la tensión nominal del relé. Atendiendo al nivel de tensión de la red podemos encontrar distintos tipos de transformadores de tensión para medida:

- Transformadores capacitivos: se emplean para muy altas tensiones.
- Transformadores inductivos: son los más comunes y se emplean para tensiones más bajas que los capacitivos.

La relación de transformación suele tener un margen de error no superior al 6% y la conexión del transformador depende del relé, puede ser en estrella, triángulo o monofásico.

## 2.2. Transformadores de intensidad

Los transformadores de intensidad (denominados TI) reducen la intensidad nominal que circula por el sistema a un nivel de intensidad que el relé pueda manejar, generalmente 1A ó 5A. El conexionado de estos transformadores se suele realizar en estrella aunque en ocasiones pueden verse conexiones en triángulo para protecciones diferenciales.

## 3. CUALIDADES DE UN SISTEMA DE PROTECCIÓN

Un sistema de protección debe tener una serie de cualidades para actuar de forma eficaz ante alteraciones:

- Fiabilidad. El sistema de protección ha de ser fiable, es decir sólo debe actuar cuando sea necesario y no debe fallar nunca. Debe evitar las desconexiones innecesarias.
- Rapidez. El sistema de protección debe actuar rápidamente para disminuir al máximo los posibles daños, para aislar la parte del sistema que esta sufriendo alguna perturbación de las zonas que operan con normalidad, etc.
- Sensibilidad. Un sistema de protección debe tener capacidad para detectar perturbaciones sean cual sean las condiciones de la red. Este aspecto es muy importante sobre todo en situaciones de carga elevada o reducida.
- Selectividad. A la hora de actuar, el sistema de protección debe aislar únicamente las partes de la red afectadas por las perturbaciones y evitar en todo caso la desconexión de una zona mayor a la afectada.



## ALCANCE Y OBJETIVO DEL PROYECTO

El objetivo de este proyecto ha sido llevar a cabo la implementación de dos relés de un fabricante español así como probar todas las funciones de las que dispone cada modelo para comprobar su correcto funcionamiento. Para el desarrollo en PowerFactory se ha empleado el lenguaje DSL (DIgSILENT Simulation Language).

Una vez finalizada la parte de desarrollo de los relés, se decidió incorporarlos a la aplicación StationWare. Esta aplicación está relacionada con la gestión de ajustes del relé y más adelante se explicará su funcionamiento. La tarea consistió en desarrollar una serie de scripts en lenguaje DPL (DIgSILENT Programming Language) para poder exportar los ajustes entre ambas aplicaciones.

## RELÉS IMPLEMENTADOS

Las protecciones que han sido objeto de este proyecto son los relés IDN e IDV. En ambos casos su función principal es la de protección diferencial aunque cuentan con otras funciones adicionales, como puede ser protección de tensión, de frecuencia, de corriente, etc. A continuación se detalla una lista de las funciones implementadas:

<b>Función</b>	<b>Descripción</b>
87	Diferencial trifásica con frenado porcentual y de armónicos.
87/50	Diferencial trifásica instantánea sin frenado.
50/51	Sobreintensidad de fases por devanado.
50N/51N	Sobreintensidad de neutro por devanado.
67N	Sobreintensidad direccional de neutro polarizada por corriente.
50Q/51Q	Sobreintensidad de secuencia inversa por devanado.
50G/51G	Sobreintensidad de tierra con entrada independiente.
50Ns	Sobreintensidad instantánea de neutro sensible.
51Ns	Sobreintensidad temporizada de neutro sensible.
87N	Faltas a tierra restringidas.
49	Imagen térmica.
49G	Imagen térmica de puesta a tierra.
27	Subtensión de fases.
59N/64	Sobretensión de neutro.
59	Sobretensión de fases.
81M/m	Sobre / Subfrecuencia.
81D	Derivada de frecuencia
24	Unidad de protección de sobreexcitación.
50/62BF	Fallo de interruptor.
50FA	Sobreintensidad de terciario (con frenado por armónicos e instantánea).
21	Protección de distancia.
60	Detección de fallo en circuito de tensión.
68/78	Detector de oscilación de potencia.

**Tabla 1. Listado de funciones y descripción de las funciones implementadas**



En los dos relés se dispone de intensidades nominales y en algunos casos cada devanado puede tener una intensidad nominal diferente comprendida entre 1A y 5A. Dado que PowerFactory nos permite introducir diferentes intensidades nominales y ajustar las unidades en valores en por unidad, no ha sido necesario realizar relés que contemplen esta diferencia.

## 1. RELÉ IDN

La protección IDN es una protección diferencial de máquina. Existen siete modelos diferentes de este relé y cada uno de estos modelos cuenta con una combinación única de funciones dentro de la familia. Además de los modelos principales también existen submodelos especiales, los cuales generalmente consisten en relés con unos rangos de ajuste diferentes a los genéricos.

A modo de resumen, en la tabla 2 se muestra la combinación de funciones de las que dispone cada modelo de relé, así como los modelos especiales existentes.

	Protección diferencial para dos devanados	Protección diferencial para tres devanados	Imagen térmica de fase	Neutro sensible	Unidad de faltas restringidas a tierra	Modelo especial 02	Modelo especial 04	Modelo especial 05	Modelo especial 06	Modelo especial 07
<b>IDN-A</b>	✓	-	-	-	-	-	✓	✓	-	✓
<b>IDN-B</b>	-	✓	-	-	-	-	✓	✓	-	✓
<b>IDN-C</b>	✓	-	✓	-	-	-	✓	✓	✓	✓
<b>IDN-D</b>	-	✓	✓	-	-	-	✓	✓	✓	✓
<b>IDN-E</b>	✓	-	-	✓	-	✓	✓	✓	-	✓
<b>IDN-F</b>	✓	-	✓	✓	-	✓	✓	✓	✓	✓
<b>IDN-G</b>	✓	-	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Tabla 2. Listado de funciones de los diferentes modelos de la protección IDN

## 2. RELÉ IDV

El relé IDV es una protección diferencial de la que también se pueden encontrar siete modelos diferentes. En este caso la combinación de funciones puede no ser única, pero pese a existir dos modelos de relé con las mismas funciones estos se diferencian en que uno de ellos tendrá unidades monofásicas y el otro trifásicas como puede ser el caso de las unidades de tensión. A diferencia de la protección IDN, en este relé no existen sub-modelos especiales. La combinación de funciones de cada modelo se resume en la tabla 3.

	Protección diferencial para dos devanados	Protección diferencial para tres devanados	Posibilidad de interruptor y medio en AT	Sobreintensidad de fase	Sobreintensidad de neutro	Direccional de neutro	Sobreintensidad de secuencia inversa	Sobreintensidad de tierra	Unidad de faltas restringidas a tierra	Máxima, mínima y derivada de frecuencia	Imagen térmica de fase	Máxima y mínima tensión (fase y neutro)	Imagen térmica de tierra	Sobreexcitación	Unidad de fallo de interruptor	Distancia	Oscilación de potencia	Fallo de fusible	Unidad de reenganche y carga fría
IDV-A	✓	-	-	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-	✓	✓	-	-	-	✓
IDV-B	-	✓	-	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-	✓	✓	-	-	-	✓
IDV-D	-	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-	✓	-	✓		✓	-	-	-	✓
IDV-E	-	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-	✓	-	✓	✓	✓	-	✓	✓
IDV-F	-	✓	✓	✓	✓	-	-	-	-	-	✓		-	-	-	✓	✓	✓	✓
IDV-G	✓	-	-	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-	✓	✓	-	-	-	✓
IDV-H	-	✓	-	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-	✓	✓	-	-	-	✓

Tabla 3. Listado de funciones de los diferentes modelos de la protección IDV



## INTRODUCCIÓN A POWERFACTORY

En los siguientes apartados se realizará una breve introducción a la programación y el área de trabajo empleados en el proyecto para la implementación de los relés.

### 1. Tipos de bloques empleados

La construcción de la lógica de un relé requiere la combinación de numerosos bloques y la mayoría de estos bloques empleados en PowerFactory han sido previamente compilados por la empresa DIgSILENT. A continuación se detalla una lista de los diferentes bloques empleados en los relés IDN e IDV, en la que se puede encontrar un relé, un tipo y su función.

Relé	Tipo	Función
RelMeasure	TypMeasure	Su función es procesar corrientes y tensiones procedentes de los transformadores de medida, para calcular valores eficaces, de secuencia, armónicos, etc.
RelLogdip	TypLogdip	Se trata de un bloque que nos permite realizar operaciones matemáticas o lógicas para producir disparos en función de las entradas.
RelUlim	TypUlim	Este bloque es un relé de tensión instantáneo. Nos permite comparar la tensión de entrada con un ajuste para emitir el disparo.
RelFrq	TypFrq	Se trata de un relé utilizado para detectar variaciones en la frecuencia. Si el valor medido supera el ajuste envía una señal de disparo.
RelFmeas	TypFmeas	Es un bloque muy parecido al bloque tipo Measure. Este bloque se utiliza para procesar tensiones y obtener su frecuencia, derivada de frecuencia, etc.
RelChar	TypChar	Este tipo de bloque nos permite comparar una entrada de tensión con una característica de disparo. Suele utilizarse en protecciones de sobreexcitación.
RelBiasidiff	TypBiasidiff	Este bloque nos permite calcular la intensidad diferencial existente entre dos o más puntos. Su disparo puede ser siguiendo una característica instantánea o de frenado.
RelToc	TypToc	Se trata de un relé de sobreintensidad temporizada. Para emitir un disparo se guía por el tipo de característica seleccionada. Si la señal de entrada supera el valor ajustado se emite el disparo.
RelIoc	TypIoc	Al igual que el anterior este también es un relé de sobreintensidad pero en este caso instantáneo.
RelDir	TypDir	Este relé se emplea para detectar la dirección de las faltas. La dirección se calcula mediante la comparación de dos entradas.
RelTimer	TypTimer	Este bloque se utiliza para introducir retardos en señales.



RelCtadapt	TypCtadapt	La función de este bloque es compensar las corrientes antes de la entrada a los bloques diferenciales. También permite establecer un devanado como referencia.
RelZpol	TypZpol	Bloque que calcula impedancias en función de la intensidad y tensión de entrada.
RelDispoly	TypDispoly	Bloque de disparo de la unidad de distancia con característica poligonal.
RelDismho	TypDismho	Bloque de disparo de la unidad de distancia con característica mho.
RelDisppoly	TypDisppoly	La función de este bloque es detectar oscilaciones de potencia.
RelFdetect	TypFdetect	Se utiliza en protecciones de distancia para detectar faltas y enviar una señal de inicio de falta.
RelRecl	TypRecl	Este bloque nos permite realizar el reenganche de la protección tras efectuar un disparo.
StaCt	TypCt	Se trata de un transformador de intensidad. Su función es transformar la intensidad que circula por la red y alimentar al relé.
StaVt	TypVt	En este caso este bloque es un transformador de tensión. Nos permite transformar las tensiones de la red para procesarlas en el relé.

**Tabla 4. Listado de bloques utilizados en PowerFactory para implementar los relés**

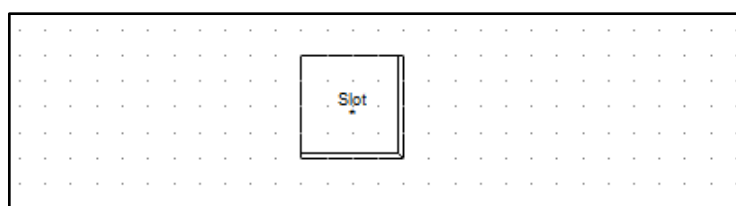
Una vez listados los diferentes relés y tipos utilizados en PowerFactory para programar los relés cabe señalar que, de aquí en adelante, cuando hagamos referencia a un bloque del tipo RelMeasure, nos referiremos al conjunto que forman el relé y el tipo puesto que ambos son necesarios e igual de importantes para el correcto funcionamiento del relé.

Cada tipo de bloque compilado dispone de infinidad de funciones implementadas, por lo que para su uso y correcta configuración es necesario emplear las referencias técnicas redactadas por la empresa DIgSILENT. En estos documentos podemos encontrar las diferentes entradas, salidas o parámetros que podemos utilizar en función de la configuración que realicemos.

## 2. Construcción de una función

Para llevar a cabo la construcción de la lógica de un relé es necesario utilizar diferentes bloques unidos por señales: bloques para la obtención de magnitudes, bloques para procesarlas y realizar el cálculo de diferentes componentes, etc. Los pasos para construir un tipo de bloque en PowerFactory son casi siempre los mismos y a continuación se realiza como ejemplo la construcción de los bloques “Wd\_1 Ct” y “Measurement W1”:

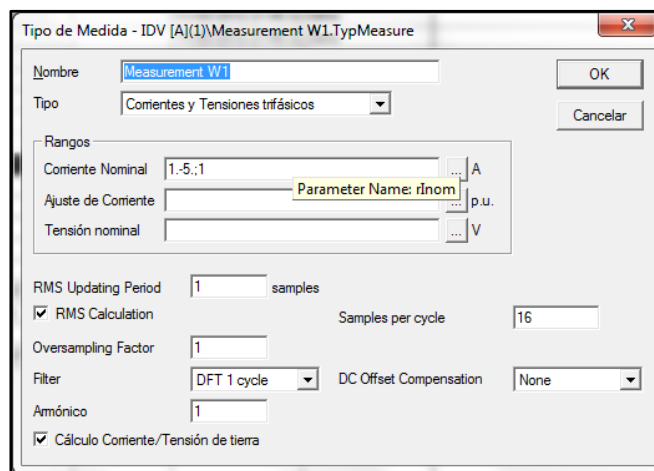
- En primer lugar creamos un slot en el diagrama. Todos los bloques por defecto son idénticos y se diferencian por el tipo de bloque que asociemos a dicho slot, así como por las diferentes entradas y salidas que utilicemos.



**Figura 1. Slot creado en PowerFactory.**

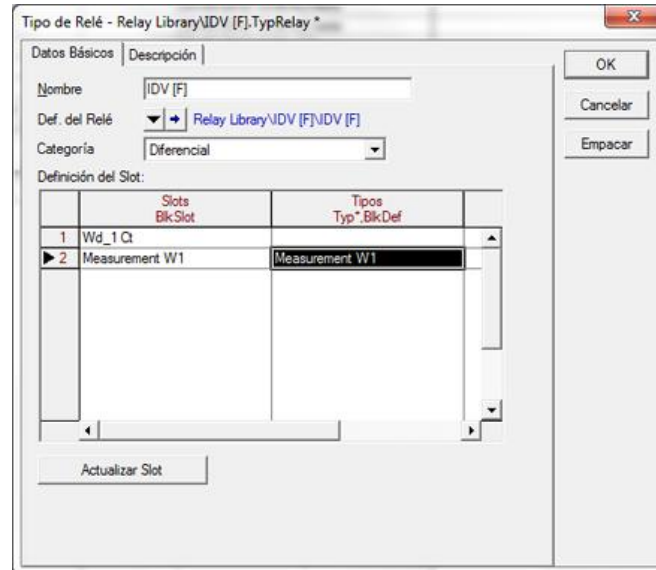
- En segundo lugar debemos crear y configuramos el tipo de bloque que necesitamos para nuestra función y que asociaremos al slot del diagrama de la figura 1. La configuración de estos bloques en algunas ocasiones es más simple que en otras, como es este caso. Puesto que utilizaremos este bloque para obtener las intensidades de fase, de secuencia, etc. le daremos una configuración de “Corrientes y tensiones trifásicas”. En el apartado rangos debemos introducir la intensidad nominal del relé, y en el caso de tratarse de un bloque para procesar tensiones, la tensión nominal del mismo.

Por último si deseamos calcular valores RMS y/o valores de intensidad o tensión homopolares debemos seleccionar estas opciones, indicando en el primer caso el método empleado para el cálculo: transformada discreta de Fourier, etc.



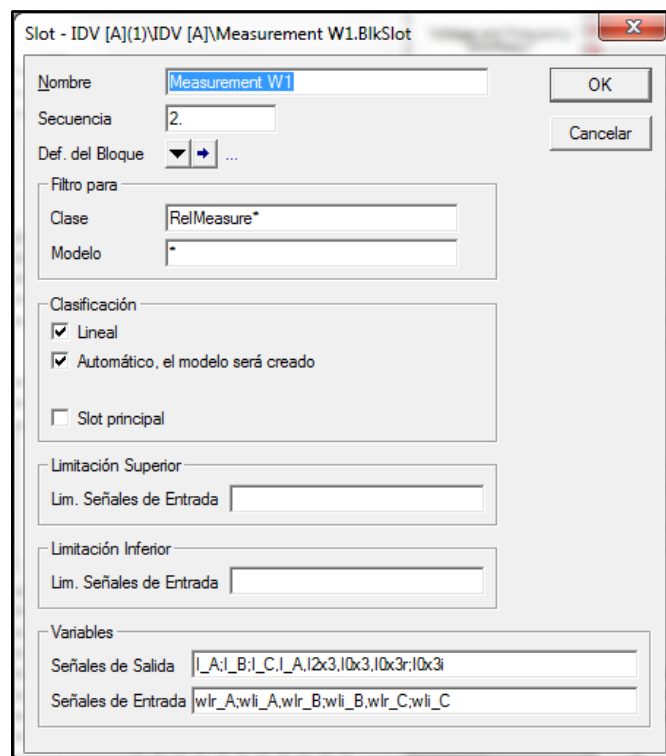
**Figura 2. Tipo de bloque de PowerFactory.**

- Una vez que disponemos del slot y tipo de bloque es necesario vincularlos para poder unir la parte gráfica de la programación con la parte de cálculos.



**Figura 3. Asociación de un Slot y un tipo de bloque.**

- El cuarto paso consiste en definir en el slot las entradas y salidas que deseamos utilizar en la función a implementar. El nombre de las entradas y salidas y la posibilidad de utilizarlas depende de la configuración del segundo paso:



**Figura 4. Definición de entradas y salidas en PowerFactory.**



- En quinto lugar se crea el relé necesario para la simulación y en el cual se establece el ajuste en función de los rangos establecidos en el tipo de bloque.

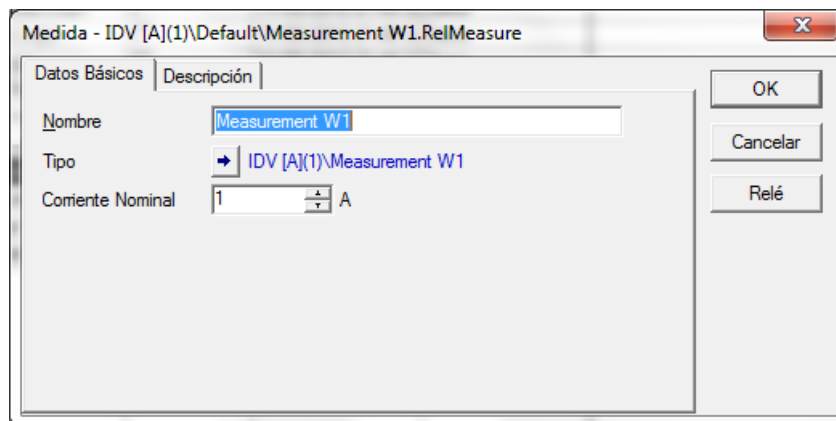


Figura 5. Relé Measure asociado al tipo de bloque de la figura 2.

- Finalmente, cuando dispongamos del resto de bloques necesarios para la función que deseamos construir, podremos enviar las señales de un bloque a otro:

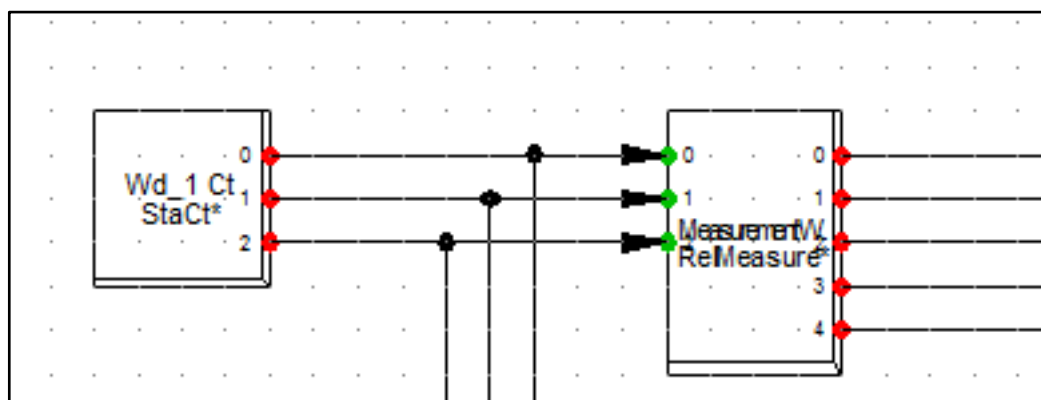


Figura 6. Conexión de señales entre dos bloques en PowerFactory.

En el ejemplo anterior se han creado dos bloques, un bloque denominado “Wd\_1 Ct” al que posteriormente se le asociará un transformador de intensidad de la red, y un bloque denominado “Measurement W1” que se encarga de procesar los fasores de corriente recibidos para obtener las magnitudes de intensidad necesarias.

Las entradas y salidas de los bloques se unen mediante señales y estas señales pueden ser de intensidad, de tensión, de impedancia, de frecuencia o señales de disparo. Todas las señales de disparo de todas las unidades van a parar a bloques lógicos RelLogdip, los cuales se pueden utilizar para realizar un disparo y abrir un interruptor, o pueden utilizarse para simplificar el número de señales de disparo presentes en el relé, de tal forma que no tengamos que manejar una gran cantidad de señales.

Dentro de estos bloques lógicos se establece una relación booleana entre las señales que entran, que bien ser OR, AND, NAND, etc. en función de lo que especifique el manual

del fabricante de la protección. El bloque dispone de un campo de configuración en el que debemos seleccionar si con él deseamos abrir un interruptor o no.

### 3. Área de trabajo

El área de trabajo de PowerFactory nos permite seleccionar entre diferentes tamaños de gráfico, como puede ser tamaño A5, A4, A3, etc. Dado que los relés implementados requieren una gran cantidad de bloques para la construcción de la lógica, en ocasiones no era posible colocarlos todos en una gráfica A0, que es el tamaño más grande. Es por esto que se ha tenido que utilizar una estructura de subrelés, con el fin de poder organizar las funciones y tener una mayor flexibilidad a la hora de implementarlas.

Un subrelé es una gráfica que se encuentra en un segundo nivel sobre la gráfica principal del relé y a la cual se accede desde alguno de los bloques de dicha gráfica. En esta gráfica de segundo nivel se encuentran agrupadas las unidades de una misma función, es decir, podemos encontrar un subrelé de tensión y frecuencia, uno de sobreintensidad, uno diferencial con frenado, uno diferencial instantáneo, etc.

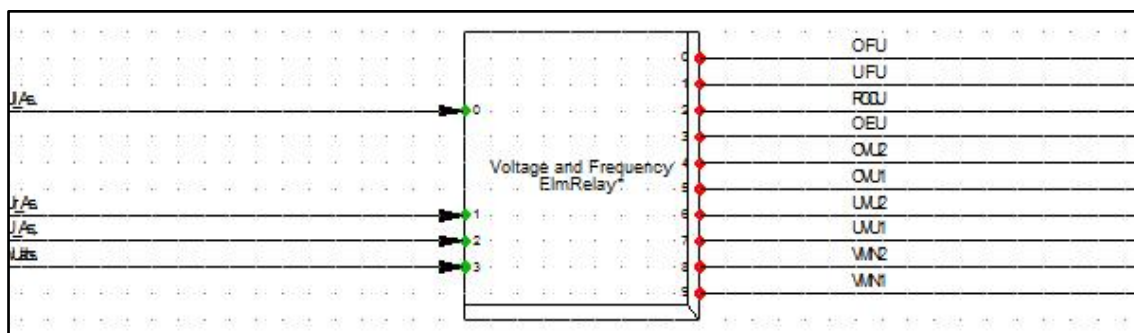


Figura 7. Subrelé de voltaje y frecuencia

En estos bloques que unen las diferentes gráficas las señales de entrada son las magnitudes sobre las que operan las unidades del interior (unidades de sobreintensidad, de máxima/mínima tensión, etc.) y generalmente las salidas son las señales de disparo de estas unidades. De esta forma se reduce el tamaño de las gráficas, se consigue una estructura más organizada y la búsqueda de funciones específicas en la lógica se vuelve muy intuitiva, ya que para encontrar una unidad de sobreintensidad determinada tendremos que dirigirnos al subrelé de sobreintensidad.

En el apartado de anexos, con la finalidad de poder apreciar mejor esta estructura de subrelés, podemos encontrar los esquemas de dos relés: el modelo G del relé IDN y el modelo E del relé IDV. En ambos casos en la primera página podemos encontrar la gráfica principal y en hojas sucesivas aparecen las gráficas de los diferentes subrelés, donde se agrupan las funciones.

Una vez creados todos los bloques necesarios y cuando el relé está terminado, se lleva a cabo el ajuste de todas las funciones y se realizan las simulaciones necesarias para verificar su funcionamiento.



## FUNCIONES IMPLEMENTADAS EN POWERFACTORY

Dado que los relés comparten algunas de las funciones, la descripción de las mismas se realizará de forma conjunta con el fin de no redundar en las explicaciones. A continuación se detallan todas las funciones implementadas en los relés.

### 1. PROTECCIÓN DE FRECUENCIA

El relé IDV cuenta con una protección que actúa ante variaciones de frecuencia. En esta protección se distinguen tres tipos de unidades diferentes:

- Protección de máxima frecuencia (81M): la función de esta unidad es disparar cuando se detectan aumentos de frecuencia. Se establece un límite superior de frecuencia y en caso de superarlo se activa la señal de disparo. Se dispone de cuatro unidades de máxima frecuencia para cada modelo con protección de frecuencia.
- Protección de mínima frecuencia (81m): esta unidad emite una señal de disparo en caso de detectar una disminución de frecuencia. En este caso el límite de frecuencia se establece por debajo de la frecuencia nominal e igual que las unidades de máxima frecuencia, cuando se supera se activa la señal de disparo. Se dispone de cuatro unidades de mínima frecuencia en cada modelo con protección de frecuencia.
- Protección de derivada de frecuencia (81D): además de disponer de las unidades de máxima y mínima frecuencia, que actúan cuando se sobrepasan determinados valores de frecuencia, también se dispone de unidades de derivada de frecuencia, que actúan cuando la disminución de frecuencia por segundo es elevada. En esta unidad se ajusta un valor de gradiente negativo de frecuencia y si se detecta un gradiente de frecuencia superior al ajustado en la unidad, se activa la señal de disparo. Cada modelo con protección de derivada de frecuencia dispone de cuatro unidades de este tipo.

La frecuencia sobre la que actúan estas unidades se calcula a partir de la tensión simple ó compuesta de la fase A en el caso de tratarse de un modelo con unidades de tensión trifásicas. Si el modelo dispone de unidades de tensión monofásicas la frecuencia se calcula a partir de la tensión simple o compuesta de la fase seleccionada.

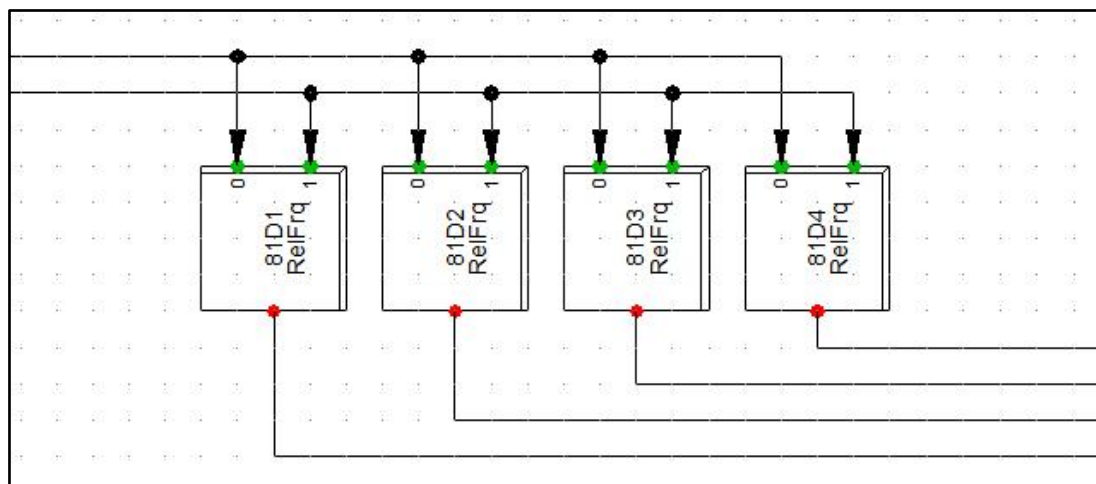
La implementación de estas unidades se ha llevado a cabo mediante bloques del tipo RelMeasure, RelLogdip, RelFmeas y RelFrq:

- En primer lugar se procesan las señales de tensión procedentes de los transformadores de medida para obtener las tensiones simples y compuestas de cada fase, tanto el valor eficaz como el fasor. Estas magnitudes obtenidas se envían por medio de señales a un bloque del tipo RelLogdip. Se utilizan cuatro señales, una para las tres tensiones de fase, otra para las tres tensiones de línea y otras dos para los fasores de fase y de línea.

- El bloque RelLogdip al que llegan las señales se ha utilizado a modo de selector<sup>5</sup>. Según el fabricante se ha de tener la posibilidad de seleccionar que tipo de tensión medir (simple o compuesta) y de que fase (fase A, B o C). Una vez obtenida la señal de tensión sobre la que se desea actuar, esta se envía al bloque RelFmeas.
- En el bloque RelFmeas, a partir de la tensión seleccionada, se lleva a cabo el cálculo de la frecuencia y de su gradiente. Estas señales se envían a los bloques RelFrq que constituyen las unidades de frecuencia propiamente dichas.
- Por último, las señales de frecuencia entran a los bloques del tipo RelFrq, donde se ajustan unos umbrales de frecuencia de disparo y unos tiempos de arranque y/o actuación. Si el valor medido supera el valor de arranque de la unidad, se activa la señal de disparo.

La implementación de las unidades de derivada de frecuencia y las de máxima/mínima frecuencia es prácticamente idéntica, pero en lugar de enviar al bloque RelFrq la señal de frecuencia se envía su derivada. La única diferencia además de la señal de entrada es la configuración del bloque, que en el primer caso se configurará para detectar gradientes de frecuencia negativos y en el segundo se establecen límites de frecuencia que no deben superarse.

Todas las unidades de frecuencia tienen como salida una señal de disparo, lo que hace un total de doce señales. Estas señales se envían a un bloque lógico para reducir estas doce señales a sólo cuatro, una por cada tipo de unidad de modo que durante los ensayos se pueda identificar que unidades están produciendo disparo y cuales no.



**Figura 8. Unidades de derivada de frecuencia**

Además de la entrada de frecuencia los bloques disponen de otra señal de entrada, una señal de inhibición por mínima tensión. Cuando se detecta una bajada de tensión por debajo del umbral ajustado en una unidad de subtensión, se emite una señal de disparo que bloquea e impide la actuación de las unidades de frecuencia.

<sup>5</sup> Dado que el selector de tensiones afecta en mayor medida a las protecciones de tensión, el procedimiento de implementación se explicará en el punto 2.

La función de inhibición por mínima tensión se ha implementado por medio de un bloque del tipo RelUlim y opera sobre la misma tensión que se utiliza para calcular la frecuencia. El ajuste de inhibición por mínima tensión es el mismo para todas las unidades de frecuencia al definirlo el fabricante como un ajuste de carácter general. Si se supera el valor de tensión mínima ajustado, se emite una señal de disparo que utiliza para bloquear las unidades de frecuencia.

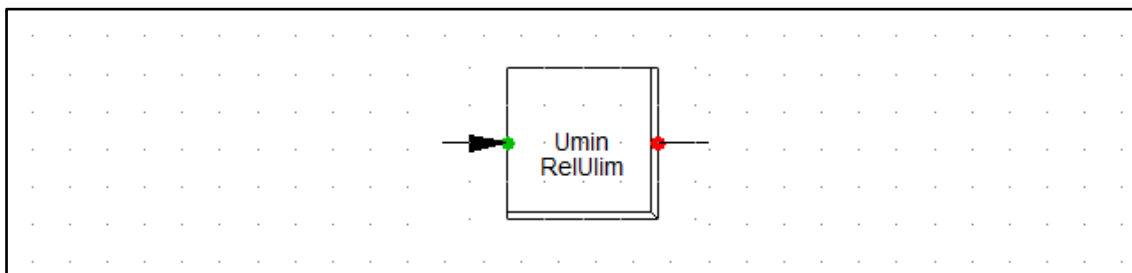


Figura 9. Inhibición por mínima tensión de las unidades de frecuencia

## 2. PROTECCIÓN DE TENSIÓN

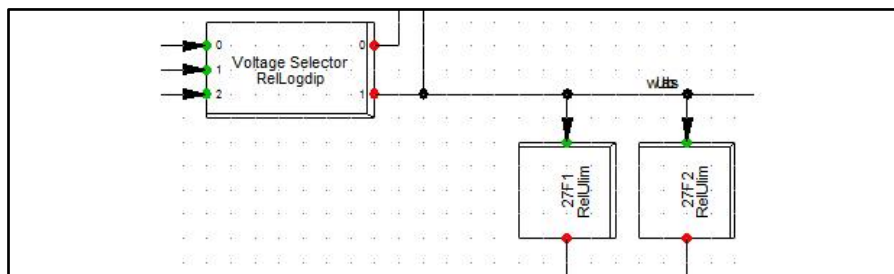
El relé IDV dispone de un conjunto de unidades de protección contra variaciones de tensión. Se han implementado diferentes unidades que actúan contra subidas o bajadas de la tensión:

- Unidades de máxima tensión (59): estas unidades de tensión actúan sobre el valor eficaz de la tensión de fase o línea. Cuando esta tensión supera el valor máximo ajustado en la unidad, se activa la señal de disparo. Se dispone de dos unidades de máxima tensión en cada modelo con protección de tensión.
- Unidades de mínima tensión (27): las unidades de mínima tensión actúan sobre el valor eficaz de la tensión de fase o línea. Si la tensión se encuentra por debajo del umbral de disparo se activa la señal de disparo. Se dispone de dos unidades de este tipo en cada modelo con protección de tensión.
- Unidades de sobretensión de neutro calculado (59N): estas unidades actúan sobre el valor eficaz de la tensión de neutro calculada a partir de las tres tensiones de fase. Si aparece una tensión de secuencia homopolar superior al valor ajustado se activa la señal de disparo. Cada modelo con protección de tensión dispone de dos unidades de este tipo.

Todas las unidades de tensión, tanto las de máxima/mínima tensión de fase, como las de máxima tensión de neutro se han implementado por medio de bloques del tipo RelUlim. Cuando la señal de entrada supera el valor ajustado se activa la señal de disparo. En este caso las señales de disparo no se envían a un bloque lógico pues únicamente se trata de seis señales de disparo, y la simplificación que obtendríamos al emplear este bloque lógico no sería muy grande.

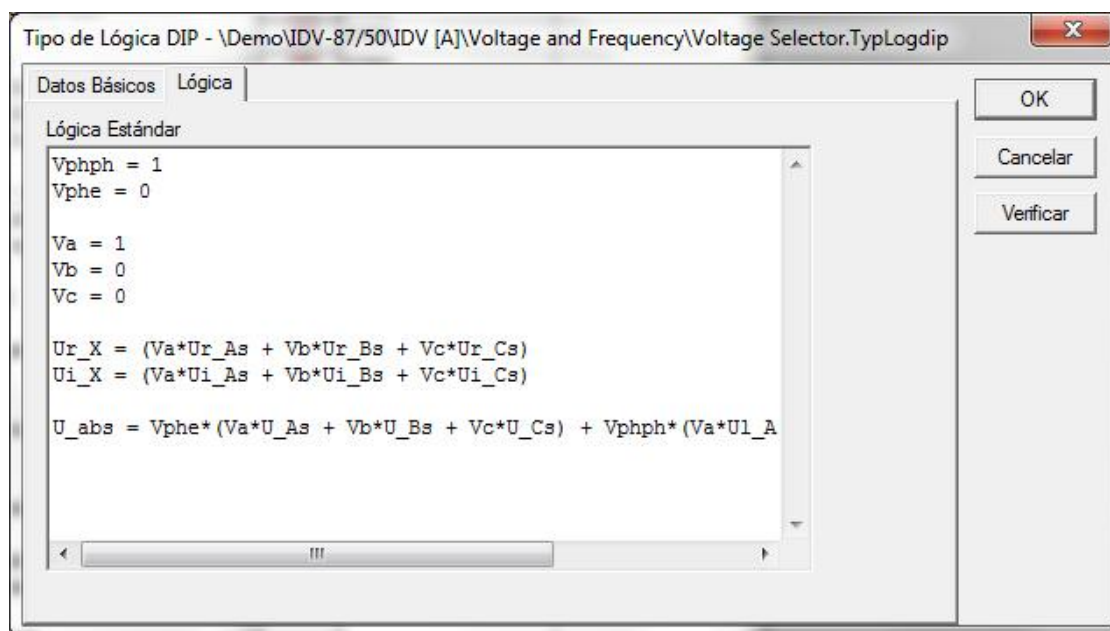
Las unidades de máxima y mínima tensión difieren de unos modelos a otros dentro de la familia IDV, en algunos casos las unidades serán monofásicas y otros trifásicas. En el

caso de las unidades monofásicas se puede actuar sobre la tensión simple o compuesta de la fase que se desee (A, B o C) mientras que las trifásicas actúan sobre la tensión simple o compuesta de las tres fases. Para llevar acabo esta selección de tipo de tensión y de fase se ha realizado un selector de voltaje por medio de un bloque RelLogdip.



**Figura 10. Unidades de mínima tensión con selector de voltaje**

Para realización del selector de voltaje que establece el manual de la protección redactado por el fabricante se ha empleado un bloque del tipo RelLogdip. La función de este bloque es poder seleccionar sobre que tipo de tensión actuar, simple o compuesta, y en caso de ser un modelo con unidades monofásicas seleccionar sobre que fase actuar, fase A, B o C.



**Figura 11. Selector de voltaje del relé IDV.**

En la figura 11 podemos apreciar ligeramente las operaciones realizadas para obtener las tensiones seleccionadas a la salida del selector de voltaje.

Se dispone de cinco variables, dos para el tipo de tensión (fase-fase ó fase-neutro) de las cuales solo una podrá tener el valor uno a la vez, y otras tres variables en el caso de ser una unidad monofásica, para seleccionar sobre que tensión se desea actuar (fase A, fase B o fase C) de las cuales también podrá haber únicamente una con valor uno a la vez.





Las señales de salida se expresan en función de las variables y de las señales de entrada, de tal forma que otorgando a las variables un valor cero hacemos que se anulen y únicamente permitimos pasar las que tengan el valor uno. Desde este bloque se envían las señales hacia las unidades de tensión y frecuencia.

### 3. PROTECCIÓN DE SOBREINTENSIDAD

Las protecciones de sobreintensidad se emplean en múltiples elementos de la red como protección generalmente ante sobrecargas, cortocircuitos, etc. Este tipo de protecciones analizan la intensidad y si se supera el valor de arranque ajustado la unidad emite la señal de disparo.

Las unidades de sobreintensidad se han implementado por medio de bloques RelIoc y RelToc. En ambos casos si la magnitud que analizan las unidades es superior al valor de arranque, se activa la señal de disparo. Estas señales de disparo se han enviado a un bloque lógico para simplificarlas, ya que en el caso del relé IDV se llegan a tener unas cincuenta señales de disparo.

La intensidad sobre la que operan estas unidades puede ser la del neutro, la de neutro calculado, la de fase, de secuencia inversa, etc. y según la característica de disparo podemos diferenciar las unidades entre temporizadas o instantáneas.

#### 3.1. Protecciones de sobreintensidad instantánea

Este tipo de protecciones se suelen utilizar como protección ante cortocircuitos y se caracterizan porque siempre que actúan ante una falta lo hacen de forma instantánea o dicho de otra manera, para cualquier nivel de intensidad por encima del nivel de arranque establecido la protección dispara siempre en el mismo tiempo.

En el caso de tratarse de unidades trifásicas, la lógica de disparo se realiza de forma OR, es decir, si alguna de las tres entradas medidas supera el valor ajustado se activa la señal de disparo. Tanto en la protección IDN como en la IDV se han implementado diversas unidades de este tipo, como son las siguientes:

- Sobreintensidad instantánea de fase (50F): estas unidades de sobreintensidad son trifásicas y actúan sobre el valor eficaz de la componente fundamental de la intensidad de fase. En el caso de la protección IDV se cuenta con tres unidades de este tipo por cada devanado.
- Sobreintensidad instantánea de secuencia inversa (50Q): este tipo de unidades de sobreintensidad son monofásicas y actúan sobre el valor eficaz de la componente fundamental de la intensidad de secuencia inversa. La protección IDV dispone de dos unidades de este tipo por cada devanado.
- Sobreintensidad instantánea de secuencia homopolar o neutro calculado (50N): estas unidades son monofásicas y actúan sobre el valor eficaz de la componente fundamental de la intensidad de neutro, calculada como suma de las intensidades de

fase. Además estas unidades tienen la posibilidad de ser direccionales, disparando hacia delante o hacia detrás.

Para el cálculo de la dirección se compara el ángulo de la intensidad de neutro con el ángulo de una magnitud de polarización que siempre debe mantenerse constante. En este caso la magnitud de polarización es la intensidad que circula por la puesta a tierra de la máquina que se protege y el desfase entre esta intensidad y la de neutro calculado siempre es 0° ó 180° salvo cuando se produce una falta. El relé IDV cuenta con dos unidades de este tipo por cada devanado, pudiendo configurarse cada una para disparar en un sentido diferente.

- Sobreintensidad instantánea de puesta a tierra (50G): las unidades de sobreintensidad de puesta a tierra son monofásicas y actúan sobre el valor eficaz de la componente fundamental de la intensidad que circula por la puesta a tierra del elemento que se protege. En este caso, el relé IDV dispone de dos unidades de este tipo para cada canal de medida de intensidad de tierra, que en algunos modelos pueden ser dos y en otros tres.
- Sobreintensidad instantánea de neutro sensible (50Ns): estas unidades monofásicas actúa sobre el valor eficaz de la componente fundamental de la intensidad de neutro. Se trata de unidades de alta sensibilidad y en el relé IDN se dispone de una unidad de este tipo por canal de medida. En este caso, la unidad de neutro sensible se bloquea si la unidad de sobreintensidad de neutro calculado activa la señal de disparo. Este bloqueo solo está disponible en los modelos de relé IDN que disponen de unidades de faltas restringidas a tierra y se emplea para poder coordinar mejor ambas funciones. El bloqueo se ha realizado con un bloque RelLogdip, el bloque dispone de dos entradas combinadas mediante un operador booleano AND y la señal que proviene de la unidad de bloqueo se encuentra negada, de tal forma que cuando tome el valor uno el resultado de la operación sea cero.
- Sobreintensidad instantánea de terciario (50FA): estas unidades monofásicas pueden ser de dos tipos, con frenado por armónicos o sin el. En el primer caso la unidad actúa sobre el valor eficaz de la componente fundamental de la intensidad de puesta a tierra del canal número dos y de las componentes de segundo y quinto armónico de dicho canal. Una vez calculadas las tres componentes, se calcula un valor de operación como:

$$OP\_1 = IT\_1 - Kf2 \cdot IT\_2 - Kf5 \cdot IT\_5 \quad (1)$$

Donde el significado de cada variable es el siguiente:

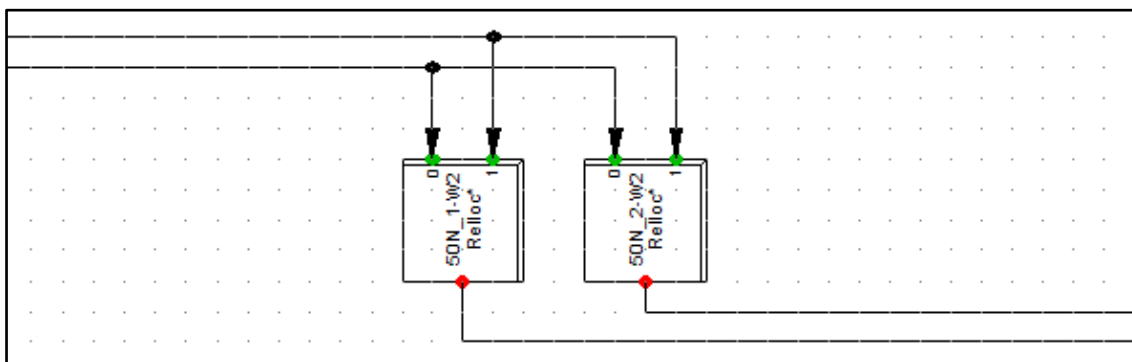
OP_1	Valor de intensidad de operación. (A)
IT_1	Valor eficaz de la componente fundamental. (A)
IT_2	Valor eficaz del segundo armónico. (A)
IT_5	Valor eficaz del quinto armónico. (A)
Kf2	Constante de frenado del segundo armónico.
Kf5	Constante de frenado del quinto armónico.



En el caso de las unidades de sobreintensidad de terciario sin frenado, éstas actúan sobre el valor eficaz de la componente fundamental de intensidad, sin tener en cuenta los armónicos presentes en ella.

La implementación de todas las unidades anteriores en PowerFactory se ha llevado a cabo por medio de los bloques del tipo RelIoc. Este tipo de bloques nos permite introducir un valor de arranque de intensidad, el tiempo de arranque de la unidad, la dirección del disparo, el tipo de intensidad medida y si se trata de intensidades monofásicas o trifásicas.

Para cada tipo de unidad se debe extraer la corriente sobre la que opera de un bloque del tipo RelMeasure. Este no siempre es el mismo ya que para cada devanado se necesita un bloque RelMeasure para las intensidades de fase y neutro calculado, otro para la intensidad de secuencia inversa y otros tres para las intensidades de puesta a tierra. Para cada uno de estos tipos de bloque es necesario definir unas señales de salida, que serán diferentes en cada caso.



**Figura 12. Bloques tipo RelIoc de sobreintensidad de neutro calculado.**

En el caso de las unidades de sobreintensidad de neutro calculado es necesario utilizar bloques del tipo RelDir, que nos permite calcular la dirección en la que se está produciendo la falta.

El cálculo de la dirección se basa en el desfase existente entre la magnitud de operación (intensidad homopolar calculada a partir de las intensidades de fase) y la magnitud de polarización (intensidad que circula por la puesta a tierra). Este desfase en condiciones normales debe tener siempre un ángulo de  $0^\circ$  ó  $180^\circ$  y cuando se produce una falta el desfase varía. Una vez calculada la dirección se envía al bloque RelIoc de neutro calculado, que en caso de estar configurada en la dirección que recibe, emitirá la señal de disparo (siempre que se supere el ajuste de intensidad de arranque). Si se recibe una señal de que la falta se está produciendo en una dirección diferente a la configurada, la unidad no activará la señal de disparo.

Finalmente para la implementación de la unidad de sobreintensidad de terciario con frenado por armónicos, es necesario utilizar un bloque del tipo RelMeasure para



calcular los armónicos mediante la aplicación de la transformada discreta de Fourier y un bloque RelLogdip, para realizar el cálculo de la magnitud de operación detallada en (1). Una vez ejecutada esta operación, la señal resultante se envía al bloque del tipo RelIoc de la unidad.

En el caso de la unidad de sobreintensidad de terciario sin frenado no es necesario realizar esta operación y la intensidad de la puesta a tierra procesada por el RelMeasure correspondiente se envía directamente al bloque RelIoc correspondiente.

### 3.2. Protecciones de sobreintensidad temporizada

Las protecciones de sobreintensidad temporizada se suelen utilizar como protecciones ante sobrecargas y el tiempo de disparo de estas unidades depende del tipo de curva característica con la que está ajustada la unidad. El tiempo de disparo depende de varios factores: la intensidad de falta, la curva seleccionada y el índice de curva ajustado. En la figura 13 se puede apreciar la curva de disparo Inversa según la normativa IEC.

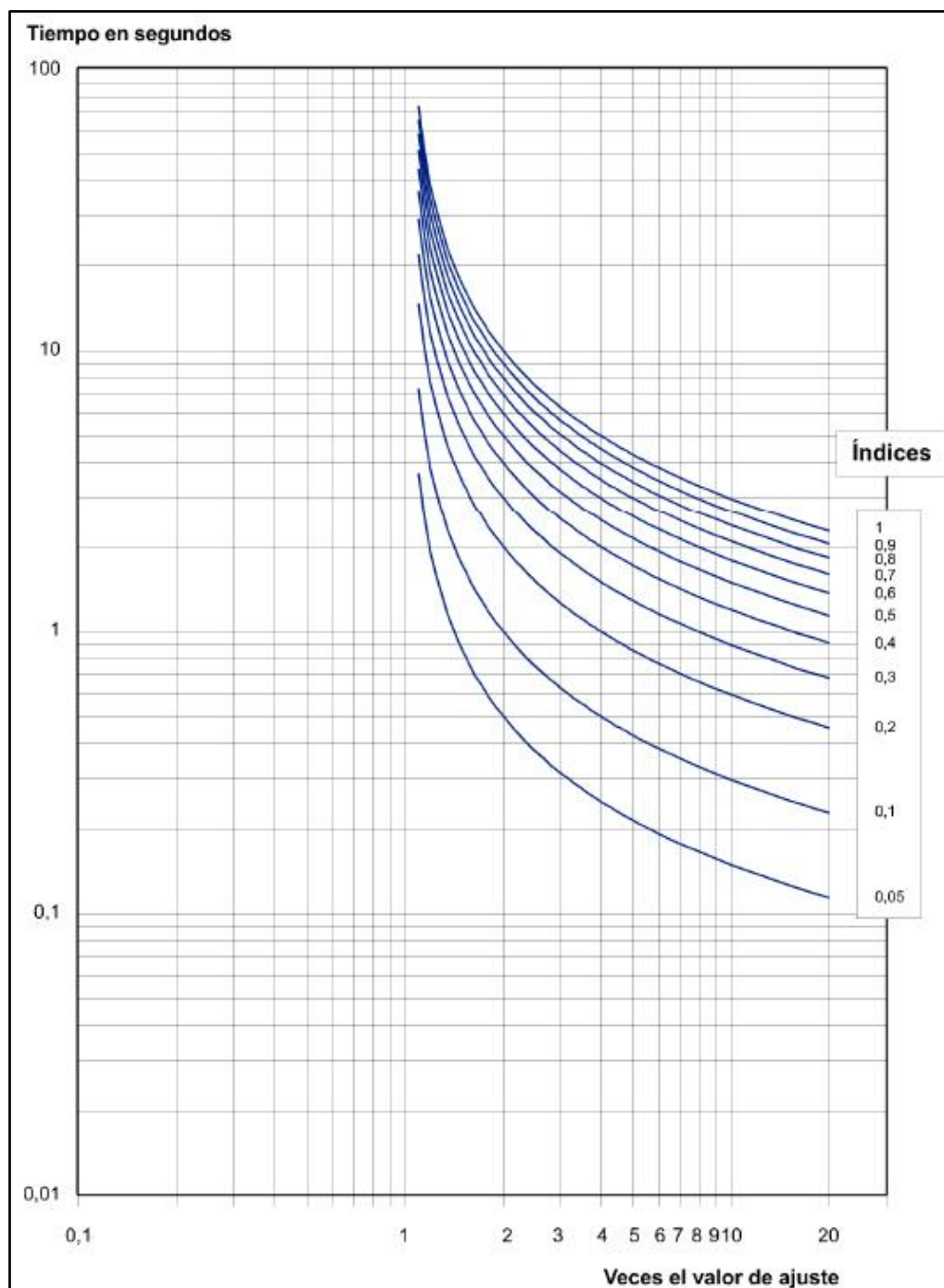


Figura 13. Curva Inversa según la normativa IEC.



La lista de curvas implementadas en los relés de PowerFactory se detalla a continuación:

Normativa	Tipo de curva
CURVAS IEC	Curva inversa
	Curva inversa + límite de tiempo
	Curva muy inversa
	Curva muy inversa + límite de tiempo
	Curva extremadamente inversa
	Curva extremadamente inversa + límite de tiempo
	Curva inversa de tiempo largo
	Curva inversa de tiempo largo + límite de tiempo
	Curva inversa de tiempo corto
	Curva inversa de tiempo corto + límite de tiempo
CURVAS IEEE	Curva moderadamente inversa
	Curva moderadamente inversa + límite de tiempo
	Curva muy inversa
	Curva muy inversa + límite de tiempo
	Curva extremadamente inversa
	Curva extremadamente inversa + límite de tiempo
CURVAS US	Curva moderadamente inversa
	Curva moderadamente inversa + límite de tiempo
	Curva inversa
	Curva inversa + límite de tiempo
	Curva muy inversa
	Curva muy inversa + límite de tiempo
	Curva extremadamente inversa
	Curva extremadamente inversa + límite de tiempo
	Curva RI inversa
	Definida por el usuario
	Sobrecarga térmica

**Tabla 5. Lista de curvas de actuación de las unidades de sobreintensidad temporizada.**

Las curvas de tiempo de la tabla 5 que disponen de un límite de tiempo de disparo son idénticas a las genéricas, con la diferencia de que se establece un tiempo mínimo de disparo, ignorando el tramo de curva que queda por debajo de este valor.

Las unidades de sobreintensidad temporizada implementadas en los relés son las mismas que las definidas en el apartado 2.1. En este caso en lugar de realizar un disparo con característica instantánea, lo realizarán siguiendo una de las curvas indicadas en la tabla 5. Además de las unidades anteriormente mencionadas hay que añadir las imágenes térmicas, las cuales sólo se encuentran con característica de disparo temporizada. En el esquema del relé se ha empleado simbología ANSI y las unidades temporizadas se distinguen de las instantáneas empleando el número 51 en lugar del 50.

Pese a existir relés térmicos, estos tienen dificultades a la hora de medir la temperatura en puntos críticos como pueden ser los devanados. Este tipo de relés realizan una lectura aproximada de la temperatura basada en puntos cercanos al devanado, por lo que el valor obtenido no es exacto. De la necesidad de disponer de mediciones lo más exactas posibles surgen las unidades de imagen térmica, que mediante métodos matemáticos basados en la física de materiales, calculan la temperatura del devanado al que están asociadas.

Las variantes implementadas de este tipo de unidades son las siguientes:

- Imagen térmica de fase (49): actúa sobre cuadrado del valor eficaz de la componente fundamental de la intensidad de la fase A. Los modelos que disponen de unidades térmicas cuentan con una unidad por devanado.
- Imagen térmica de puesta a tierra (49G): la diferencia con la unidad anterior radica en que ésta opera sobre la intensidad de la puesta a tierra. Los modelos con imagen térmica de puesta a tierra cuentan con una unidad de este tipo por cada canal de medida.

Estas unidades térmicas emplean una curva específica de disparo de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$t = \tau \cdot \ln(I^2 - I_p^2) / (I^2 - I_{max}^2) \quad (2)$$

Donde el significado de cada variable es el siguiente:

t	Tiempo de operación de la unidad térmica (s).
$\tau$	Constante de tiempo (s).
I	Valor eficaz de la componente fundamental de la intensidad medida (A).
$I_p$	Intensidad previa a la falta (A).
$I_{max}$	Intensidad máxima admisible (A).

En ambos casos cuando el valor de la intensidad medida supera el ajuste de arranque de la unidad se activa la señal de disparo, que se producirá en el tiempo asociado a dicha intensidad.



## 4. PROTECCIÓN DIFERENCIAL

La protección diferencial (número ANSI 87) es una de las protecciones más selectivas que podemos encontrar, especialmente frente a cortocircuitos. Esta protección se basa en la comparación de la corriente que circula por el elemento que se protege, generalmente los puntos de medida son las entradas y salidas de dicho elemento (líneas, alternadores, transformadores, etc.).

En el caso de producirse una falta dentro de la zona de protección aparece una intensidad diferencial entre los puntos de medida, mientras que si la falta se produce fuera de la zona de protección no debería detectarse ninguna intensidad diferencial.

En el caso de los relés implementados, dado que las unidades diferenciales son monofásicas, la comparación de corrientes se realiza para cada fase de todos los devanados<sup>6</sup> medidos por la protección. Si la intensidad diferencial supera los rangos ajustados, es síntoma de que existe una falta interna, por lo que dispara.

Para la implementación de las unidades diferenciales en PowerFactory se hace necesario utilizar un conjunto de bloques:

- RelMeasure: este tipo de bloque nos permite calcular el módulo y argumento de las corrientes que proceden de la red para posteriormente enviarlos a los bloques adaptadores.
- RelCtadapt: este bloque es necesario emplearlo puesto que si la protección diferencial se emplea para proteger transformadores, es necesario compensar las diferentes relaciones de transformación de intensidad, los niveles de tensión, el grupo horario del transformador, igualar la toma, etc. En caso de emplearse para proteger líneas también podría ser necesario compensar diferentes ratios de transformación, pues la intensidad nominal de los devanados puede ser diferente. Este bloque también nos permite seleccionar un devanado como devanado de referencia para medidas. Las corrientes que obtenemos a la salida ya se encuentran compensadas y se envían directamente al bloque diferencial.
- RelBiasidiff: este bloque constituye la unidad central de la función, nos permite comparar la intensidad procedente de dieciocho puntos diferentes como puede ser el caso de una barra con múltiples líneas de salida. Una vez calculada la intensidad diferencial, esta se envía nuevamente a la unidad diferencial en forma de realimentación.

---

<sup>6</sup> En algunos modelos las protecciones disponen de protección para máquinas de dos devanados y puede proteger hasta un máximo de tres con posición de interruptor y medio.

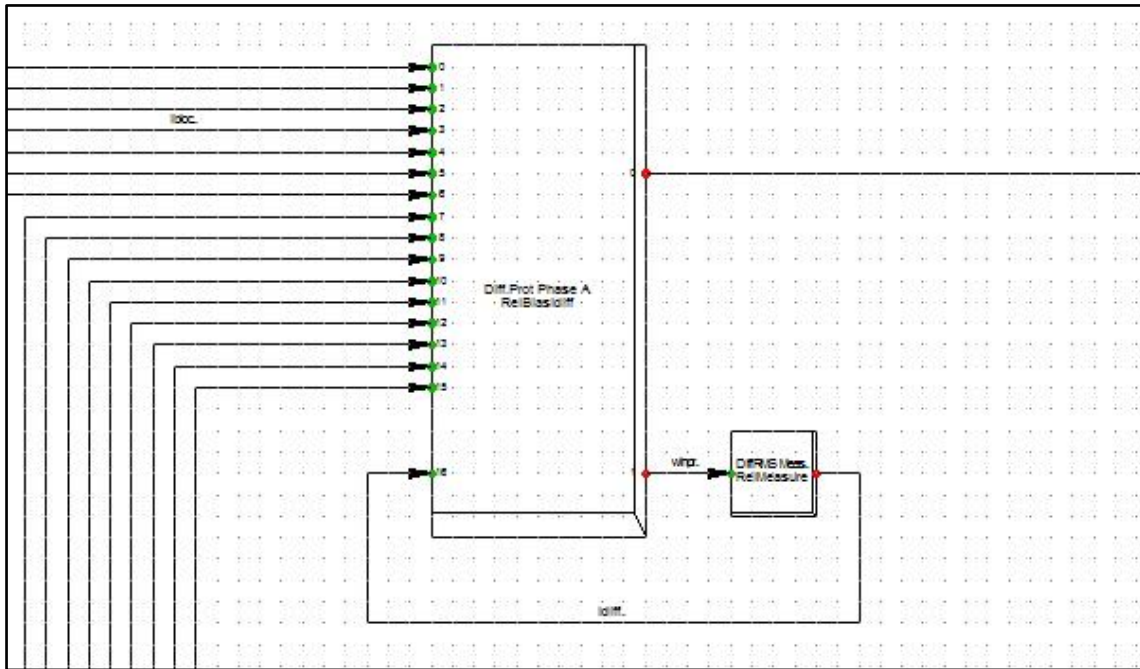


Figura 14. Bloque diferencial de la fase A con bloqueo por armónicos.

Dentro de las unidades diferenciales implementadas podemos encontrar dos tipos diferentes, por un lado encontramos las unidades diferenciales con frenado y por el otro las unidades diferenciales instantáneas.

#### 4.1. Protección diferencial con frenado

Este tipo de protección diferencial proporciona un disparo con una característica de respuesta de frenado porcentual.

Además de la intensidad diferencial definida en el punto 1, a la hora de actuar también tiene en cuenta la denominada intensidad de paso o frenado. La intensidad de paso o frenado, se define como la media de las intensidades de la misma fase que miden los transformadores de intensidad de los que dispone la protección. La función del frenado es insensibilizar la unidad antes faltas externas, y si la intensidad diferencial no supera el porcentaje establecido de tensión de frenado, la protección no disparará.

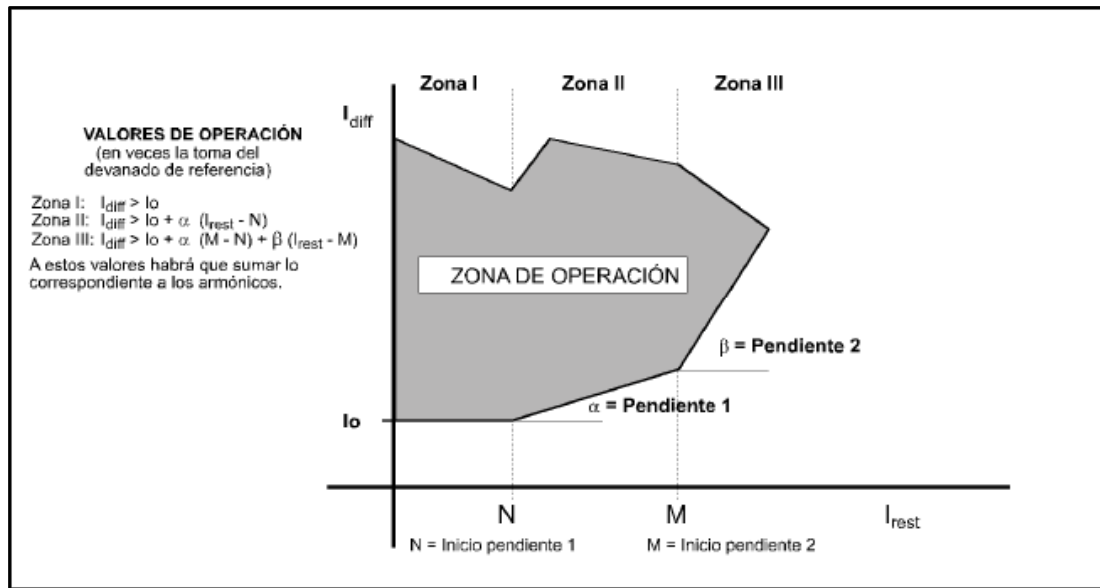


Figura 15. Característica porcentual de operación de los relés IDN e IDV extraída del manual del fabricante.

En la figura 15 se puede observar la característica porcentual de actuación de las protecciones diferenciales implementadas. A medida que aumenta la intensidad de frenado o paso, la intensidad diferencial necesaria para que la protección diferencial dispare es mayor. En condiciones de operación normales, la intensidad diferencial es nula por lo que independientemente de la intensidad de frenado que exista la unidad no dispara. Tanto en el relé IDN como en el IDV se dispone de tres protecciones diferenciales monofásicas con frenado.

En PowerFactory se ha utilizado la siguiente configuración para el bloque RelBiasidiff:

- Tipo de pendiente estándar: se define un inicio para la pendiente uno y otro para la pendiente dos. La posición de la pendiente dos depende de el mayor valor de la pendiente uno.

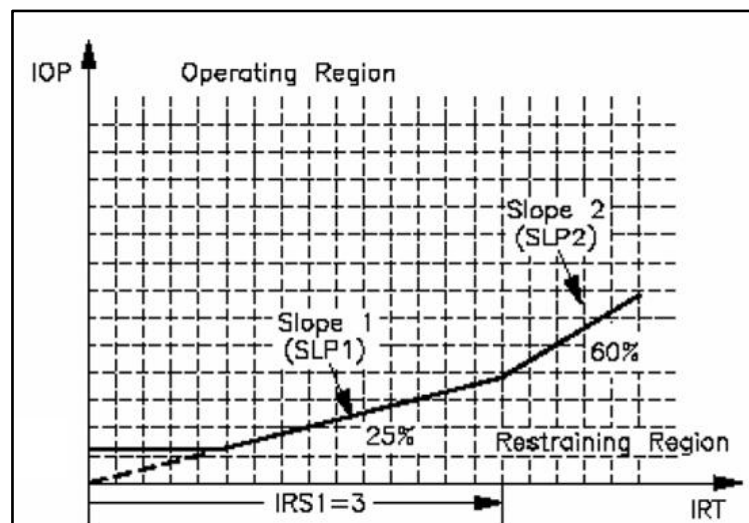


Figura 16. Tipo de pendiente utilizada en las unidades diferenciales.





- Tipo de frenado “media”: la magnitud de frenado se calcula utilizando la media de los valores eficaces de intensidad de cada TI para cada fase:

$$I_{RT\_A} = \frac{ICT1\_A + \dots + ICTn\_A}{n_{act\_A}} \quad (3)$$

Donde el significado de cada variable es el siguiente:

$I_{RT\_A}$	Intensidad de frenado para la fase A (A).
$ICTn\_A$	Intensidad eficaz procedente del TI número n (A).
$n_{act\_A}$	Número de señales de intensidad conectadas con un valor de intensidad eficaz superior a $I_{creo}$ .

#### 4.1.1. Frenado por armónicos

Esta función de frenado por armónicos solo es aplicable cuando el relé se utiliza para proteger transformadores y autotransformadores. Durante la energización de un transformador se producen intensidades de magnetización con un alto contenido en armónicos y la intensidad por el lado de alimentación es mayor, ya que hay que aportar la energía necesaria para magnetizar el núcleo, por lo cual aparece una intensidad diferencial que debe ser controlada para evitar que la unidad dispare en estas situaciones.

El principio de operación de esta función se basa en extraer la intensidad con contenido armónico (2º, 3º, 4º ó 5º) y utilizarla para insensibilizar la unidad diferencial. Esta intensidad se divide entre una constante (cuyo valor es ajustable entre 0.05 y 0.8) y se suma a la intensidad diferencial obtenida mediante la característica de frenado, con el fin de aumentar el frenado de la unidad y hacerla menos sensible a la intensidad diferencial en estas situaciones de energización.

Finalmente esta función no se ha podido implementar, puesto que los bloques diferenciales compilados de PowerFactory no nos permiten actuar sobre la intensidad de frenado. Se han analizado distintas posibilidades para intentar implementar esta función, pero ninguna cumplía las especificaciones del manual del fabricante.

#### 4.1.2. Bloqueo por armónicos

Las unidades diferenciales del relé IDV también disponen de una función de bloqueo por armónicos que permite llevar a cabo un bloqueo total de la unidad diferencial con frenado cuando los niveles de los armónicos superen unos porcentajes ajustables sobre la intensidad de frecuencia nominal.

Los bloques diferenciales utilizados en PowerFactory disponen de una opción de bloqueo por armónicos, por lo que debemos extraer los armónicos 2º, 3º, 4º y 5º de la



intensidad procedente de cada devanado mediante los bloques del tipo RelMeasure. Esta intensidad se extrae mediante la aplicación de una transformada discreta de Fourier y se envía a las entradas de la unidad diferencial programadas para bloquear la unidad.

En el caso del tercer armónico no se dispone de una entrada para bloquear la unidad diferencial en el caso de que el nivel de este armónico sea elevado por lo que la implementación es algo diferente. En este caso se ha necesitado emplear un bloque Relloc y un bloque RelLogdip. En el primero se compara el porcentaje de intensidad de segundo armónico con el ajuste establecido. Si se supera este umbral, la señal de disparo se envía a un bloque RelLogdip donde se concentran todos los disparos de bloqueo de segundo armónico de todos los devanados para la misma fase. Este bloque ha sido necesario emplearlo ya que en cada bloque solo podemos disponer de una entrada de cada tipo (no debe definirse dos veces la misma entrada puesto que podría provocar problemas en la simulación). En este bloque se establece una relación booleana OR entre las señales de entrada y la salida se envía a la entrada genérica de bloqueo de la unidad diferencial (denominada “iblock”).

#### **4.2. Protección diferencial instantánea**

Estas unidades tienen un ajuste alto de intensidad diferencial y su función es detectar faltas graves. La característica de disparo de este tipo de unidad diferencial únicamente tiene en cuenta la intensidad diferencial, es decir, no se aplica ningún tipo de frenado puesto que frenar una falta grave podría tener graves consecuencias para los elementos protegidos.

La implementación de este tipo de unidades con respecto a las diferenciales con frenado es muy parecida a la explicada en el punto 4. Dicha implementación es algo más sencilla ya que no hay que tener en cuenta los frenados y bloqueos por armónicos. Tanto en el relé IDN como en el IDV se dispone de tres protecciones diferenciales monofásicas instantáneas.

## 5. PROTECCIÓN DE FALTAS A TIERRA RESTRINGIDAS

La unidad de faltas restringidas a tierra (Restricted Earth Faults) se utiliza para detectar faltas internas en transformadores y generadores. El principio de funcionamiento de esta unidad es el mismo que el de la unidad diferencial detallado en el punto 4, por lo que no se repetirá. Este tipo de protección se suele utilizar de forma complementaria a las unidades de sobreintensidad de neutro sensible, que en ocasiones no tienen un comportamiento muy adecuado.

En este caso, en lugar de calcular la intensidad diferencial entre las corrientes de línea de dos puntos, la intensidad diferencial se calcula como la diferencia entre la intensidad que circula por la puesta a tierra y la intensidad de neutro calculada a partir de las tres corrientes de fase. En el caso de producirse una falta interna aparecerá una intensidad diferencial entre estas dos magnitudes y si esta intensidad diferencial supera la intensidad de frenado establecida, la unidad emitirá una señal de disparo.

Para la implementación de las unidades se han empleado bloques RelBiasidiff y RelMeasure. En primer lugar extraemos las intensidades de puesta a tierra y de neutro calculado de sus respectivos bloques RelMeasure y estas se envían al bloque RelBiasidiff donde se calcula la intensidad diferencial entre ambas magnitudes. Por último se calcula el valor eficaz de la intensidad diferencial, se envía nuevamente al bloque diferencial y si se superan los ajustes sensibilidad y frenado se activa la señal de disparo de la unidad.

Para esta función del relé también es necesario utilizar bloques adaptadores con la finalidad de compensar ratios de transformación de intensidad puesto que la intensidad nominal de los devanados de puesta a tierra y fase puede ser diferente.

En el relé IDN se dispone de una unidad de este tipo por canal de medida, mientras que en el relé IDV el número de unidades por canal de medida es de dos.

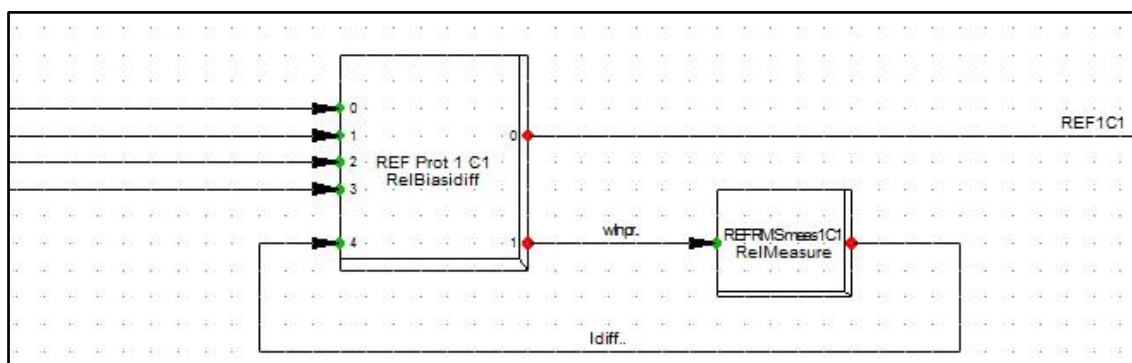


Figura 17. Protección de faltas a tierra restringidas modelada en PowerFactory.

## 6. PROTECCIÓN DE FALLO DE INTERRUPTOR

La misión de esta protección (también denominada 50BF) es detectar fallos en la apertura de los interruptores efectuadas por las distintas unidades del relé. Cuando se detecta que está produciéndose una falta y el relé a su vez está emitiendo la señal de disparo pero la apertura del interruptor asociado no se lleva a cabo, la unidad de fallo de interruptor entra en funcionamiento.

El relé IDV implementado en PowerFactory dispone de dos señales de disparo, una que se activa siempre que dispare alguna de las unidades del relé, y otra señal que está asociada a la unidad de fallo de interruptor.

La unidad de fallo de interruptor dispone de un temporizador, una unidad de sobreintensidad de fase y una unidad de sobreintensidad de neutro para cada devanado. Cuando alguna de las unidades de sobreintensidad detecta que existe una falta emite una señal de disparo. Esta señal llega al temporizador donde se recibe una señal más, la señal de disparo producida por el resto de las unidades del relé. Cuando ambas señales están activas comienza a correr el tiempo para emitir el disparo de reserva, si una de las dos señales se repone antes de alcanzar el tiempo establecido, la unidad anula el disparo.

En PowerFactory se ha implementado una unidad de este tipo por cada devanado por medio de bloques del tipo RelIoc, RelLogdip y RelTimer. En algunos modelos se debería de disponer de una unidad de fallo de interruptor por cada interruptor protegido, mientras que en otros sólo se especifica que se utiliza una unidad por devanado protegido. En ambos casos la unidad es idéntica ya que el bloque RelLogdip nos permite asociar infinitos interruptores a cada unidad de fallo de interruptor.

En la figura 18 se puede apreciar el esquema de la unidad de fallo de interruptor para el devanado uno.

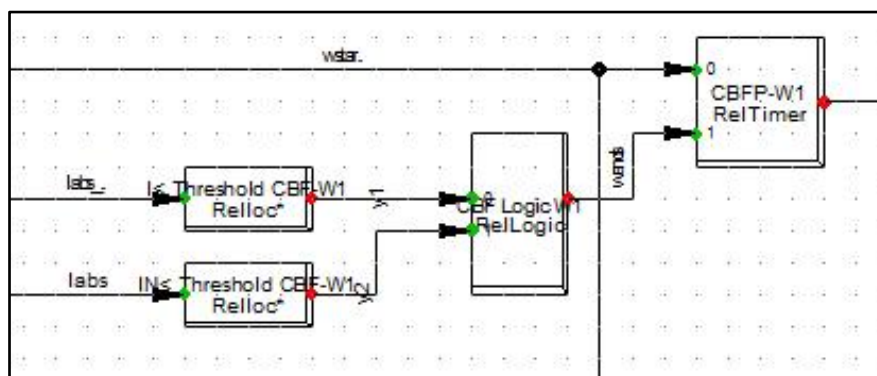


Figura 18. Unidad de fallo de interruptor del devanado uno.

## 7. PROTECCIÓN DE SOBREEXCITACIÓN

La unidad de sobreexcitación (número ANSI 24) tiene como misión proteger máquinas frente a situaciones de sobretensión y subfrecuencia. Cuando la tensión aumenta o la frecuencia disminuye con respecto a los valores nominales, se puede superar el flujo magnético máximo saturando el núcleo, lo que puede producir graves daños en la máquina debido al aumento de tensión entre las chapas magnéticas que conforman el núcleo. La unidad de medida de la excitación es la relación V/Hz.

Para la implementación de esta unidad se han utilizado los bloques del tipo RelFmeas, RelLogdip y RelChar.

En el bloque del tipo RelFmeas calculamos la frecuencia a partir de la tensión elegida mediante el selector de voltaje descrito en el punto número 2, posteriormente enviamos esta señal a un bloque del tipo RelLogdip donde realizamos la operación matemática necesaria para poder calcular la excitación que se está aplicando:

$$VHz = (wUabs / wFreg)/(wUnom/wFnom) \quad (4)$$

Donde el significado de cada variable es el siguiente:

VHz	Excitación aplicada a la máquina (V/Hz)
wUabs	Tensión aplicada a la máquina medida por el relé (V)
wFreg	Frecuencia de la señal de tensión aplicada medida por el relé (Hz)
wUnom	Tensión nominal de la red vista desde el relé (V)
wFnom	Frecuencia nominal de la red (Hz)

Finalmente esta señal VHz se envía a un bloque del tipo RelChar donde se introduce la característica de operación de la unidad y se ajusta el valor de arranque de la unidad. Cuando se produce una situación de sobretensión o subfrecuencia, la relación V/Hz aumenta y en caso de superar el valor de arranque ajustado, se activa la señal de disparo.

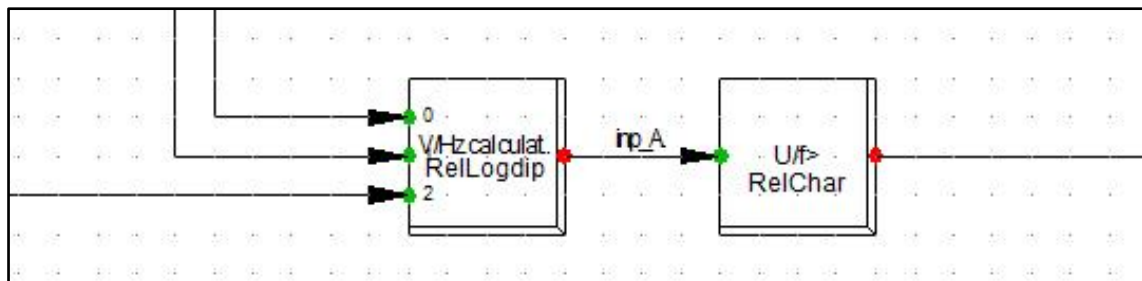


Figura 19. Cálculo de excitación y unidad de sobreexcitación.

En lo referente al tiempo de actuación de la unidad de sobreexcitación, podemos elegir entre tiempo fijo y una curva inversa. La ecuación de la curva inversa es la siguiente:



$$t = 0.8 + \frac{2 \cdot K}{\left( \frac{\frac{V}{f}}{K \left( \frac{V_N}{f_N} \right)} - 1 \right)^2} \quad (5)$$

Donde el significado de cada variable es:

- t Tiempo de actuación de la unidad (s).
- k Ajuste del dial de excitación.
- V Tensión de fase medida (V).
- V<sub>N</sub> Tensión nominal (V)
- f Frecuencia medida (Hz).
- f<sub>N</sub> Frecuencia nominal (Hz).

## 8. PROTECCIÓN DE DISTANCIA

Las protecciones de distancia (número ANSI 21) son una de las más utilizadas en las líneas de muy alta tensión y alta tensión debido principalmente a su gran selectividad. La protección recibe el nombre de “distancia” porque calcula la distancia hasta el lugar donde se produce una falta por medio del cálculo de impedancias. Estas impedancias se calculan a partir de las intensidades y tensiones medidas por los transformadores de medida. Las líneas y transformadores de una red eléctrica poseen impedancias que dependen de la distancia, es por esto que calculando la impedancia obtendremos una distancia hasta la falta muy aproximada.

Al relé se le asigna una zona de actuación, y si la impedancia medida se encuentra dentro de sus límites, éste debe actuar para abrir el/los interruptores asociados. Normalmente la zona total de actuación de una protección de distancia suele estar dividida en cuatro:

- Zona 1: protege hacia delante el 85% de la línea en la que se encuentra. Si se detecta una falta en esta zona se actúa en instantáneo, es decir, 0 milisegundos.
- Zona 2: protege hacia delante el 100% de la línea en la que se encuentra y un 50% de la siguiente más corta. En caso de detectar una falta en esta zona el tiempo de actuación es de 400 milisegundos.
- Zona 3: protege hacia delante el 100% de la línea principal y un 150% de la línea más larga. El tiempo de actuación en esta zona es de 800 milisegundos.
- Zona 4: esta zona se encuentra situada detrás del relé y se utiliza únicamente como apoyo para otras protecciones de distancia.

De lo anterior, también se deduce que las protecciones de distancia son direccionales. La dirección en la que se encuentra la falta se calcula de forma similar a la protección



de neutro calculado direccional. Se dispone de una magnitud de operación, que en este caso es la intensidad de línea ó fase, y de una magnitud de polarización cuya fase se supone constante, que puede ser la tensión de línea o de fase.

En el caso del relé IDV, según el manual de la protección se dispone de una protección de distancia que cuenta con cuatro zonas de actuación. Para cada zona de actuación se dispone de seis unidades de medida, una para cada tipo de falta y la característica de disparo puede ser MHO y/o cuadrilateral. Además esta unidad de distancia debe poder asignarse tanto al devanado uno como al dos, por lo que ha sido necesario realizar otro selector de devanado similar al implementado en la protección de tensión y que se describe en el apartado 2.

En total deberíamos de disponer de 48 unidades de distancia, pero PowerFactory nos permite realizar una simplificación utilizando únicamente 16 unidades, dos para cada zona donde una se utilizaría para las faltas a tierra y otra para las faltas entre fases. Para la implementación de la unidad de distancia en PowerFactory se han empleado numerosos bloques:

- En primer lugar se han utilizado bloques del tipo RelFdetect cuya misión es detectar que se está produciendo una falta. Este bloque actúa sobre los valores eficaces de la componente fundamental de la intensidad de fase y homopolar, que se extraen de un bloque RelMeasure. En este bloque se ajusta un valor de intensidad a partir del cual se supone que se está produciendo una falta y se activa una señal de disparo. En esta señal de disparo se han añadido bloques RelTimer para introducir la temporización asociada a cada zona.
- Por otra parte se han empleado bloques del tipo RelZpol, para calcular la impedancia hasta la falta, las tensiones e intensidades de operación, etc. Estos bloques calculan la impedancia a partir de las tensiones de fase y línea, y sobre las intensidades de fase y línea.
- En el caso de las unidades cuadrilaterales se han empleado bloques del tipo RelDispoly mientras que para las unidades de característica MHO se han utilizado bloques RelDismho. En estos bloques finalmente se comparan los valores de entrada con los ajustes de arranque, y si se superan se activa la señal de disparo.

Las señales de disparo de las unidades de distancia se envían a bloques lógicos, ya que según el manual de la protección, en caso de configurar las unidades como cuadrilaterales y MHO, el disparo debe realizarse con una lógica AND, mientras que si solo tenemos activa una de las características la lógica de disparo debería ser OR.



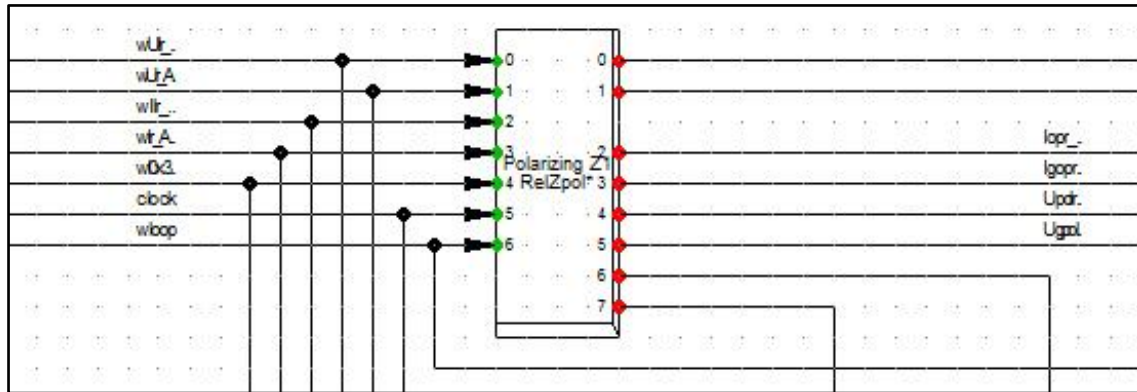


Figura 20. Bloque para cálculo de impedancias, señales de tensión y corriente de polarización y operación.

### 8.1. Detector de fallo de fusible

Esta unidad se utiliza para inhibir el disparo de las unidades de distancia. El relé, como protección propia, dispone de una serie de fusibles a la entrada de sus canales de medida: intensidad, tensión, etc. En caso de que uno de estos fusibles se fundiese la entrada de tensión de ese canal sería nula, lo que podría provocar un falso disparo.

Cuando se detecta una tensión inferior a 30V en alguna de las fases se emite una señal de bloqueo para inhibir las unidades de distancia. Así mismo, también se dispone de una unidad que bloquea el disparo de la unidad de fallo de fusible. Cuando se detecta una intensidad de secuencia directa inferior a  $0.02 \cdot I_n$  A (donde  $I_n$  es la intensidad nominal del relé) se bloquea la actuación de la unidad de fallo de fusible.

Para la implementación de la unidad de fallo de fusible se ha empleado un bloque del tipo RelUlim trifásico configurado como baja tensión. La señal de entrada son las tres tensiones de fase obtenidas de un bloque del tipo RelMeasure.

Por otra parte para el bloqueo por intensidad de secuencia directa se ha utilizado un bloque del tipo RelIoc con salida negada (el bloque RelIoc es un relé de sobreintensidad, por lo que debemos negar la salida para obtener un disparo por mínima intensidad). La intensidad de secuencia directa como en todos los casos se extrae de un bloque RelMeasure.

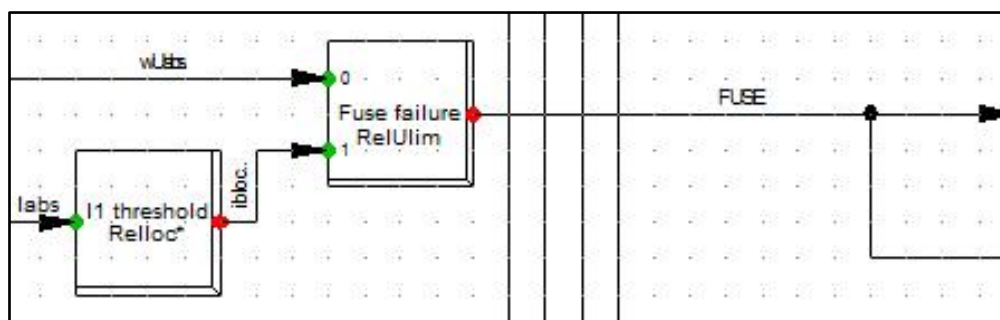


Figura 21. Unidad de fallo de fusible con bloqueo por intensidad de secuencia directa.



## 8.2. Detector de oscilación de potencia

En un sistema eléctrico se pueden producir oscilaciones de potencia provocadas por desequilibrios entre la generación y la carga. Durante las oscilaciones de potencia, la tensión e intensidad varían tanto en módulo como en argumento por lo que se podría producir un disparo cuando realmente no se debería producir.

Los relés IDV con protección de distancia cuentan con un detector de oscilación de potencia (en inglés “Out of step” o “Power Swing”) que bloquea las unidades de distancia en caso de detectarse dicha oscilación.

Para su implementación en PowerFactory se ha empleado un bloque del tipo RelDispspoly cuyas señales de entrada son los valores de impedancia calculados y la señal de detección de falta. Para detectar las oscilaciones de potencia este bloque realiza un análisis de la velocidad con la que un punto se traslada sobre el diagrama R-X. Cuando se produce una falta en la red, los puntos del diagrama R-X se mueven a una velocidad elevada, mientras que en el caso de una oscilación de potencia la velocidad es más baja.

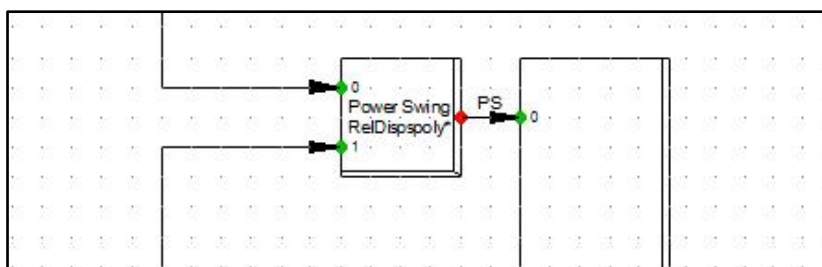


Figura 22. Detector de oscilación de potencia.

Cuando el detector de oscilación de potencia detecta que existe una perturbación emite una señal de disparo para bloquear las unidades de distancia.

## 9. REENGANCHADOR

La unidad de reenganche (número ANSI 79) nos permite cerrar un interruptor después de que este haya sido abierto tras una falta.

En ambos casos, tanto para la protección IDN como para la protección IDV, esta función no aparece completamente definida en los manuales, pero si que se hace referencia a ella dentro del capítulo de símbolos asociados al display. Además acudiendo a la aplicación Zivercomplus tampoco se ha podido encontrar información sobre esta función en cuanto a unidades sobre las que actúa o tiempos de actuación. Por todo lo anterior, la implementación de la función se ha dejado preparada para en un futuro, si se obtiene la información necesaria, poder realizarla de forma sencilla.

La implementación se ha llevado a cabo por medio de un bloque RelRecl, el cual nos permite definir hasta cinco tiempos diferentes de reenganche. Cuando se detecta que se

ha abierto un interruptor tras una falta, el reenganchador envía una señal de cierre de interruptor y otra señal para bloquear/desbloquear las unidades sobre las que actúa. La señal de cierre de interruptor, previamente pasa por un bloque RelLogdip en el cual imponemos la condición de que si esa señal posee el valor uno, debemos cerrar el interruptor. Las señales de bloqueo de las unidades asociadas se enviarían a las entradas denominadas “iblock” de estos bloques, para así activarlas ó desactivarlas.

## 10. UNIDAD DE CARGA FRÍA

La unidad de carga fría está asociada a la unidad de reenganche. Cuando un interruptor permanece abierto durante un periodo largo de tiempo tras una falta que no ha sido reenganchada, pueden aparecer problemas si al cerrar el interruptor se arrancan motores de gran tamaño. Estos arranques pueden producir picos de intensidad elevados dando lugar a un disparo en falso del relé.

La función de la unidad de carga fría aumenta los valores de arranque de intensidad durante un periodo de tiempo cuando se cierra el interruptor, de tal forma que no se lleguen a producir desconexiones por el arranque de las cargas. Una vez transcurrido este tiempo, se restablecen los ajustes predefinidos.

La implementación de esta unidad se ha llevado a cabo por medio de mismo bloque empleado en la unidad de reenganche (RelRecl). Este bloque nos permite introducir los rangos de tiempo durante los que actúa la unidad. Esta unidad de carga fría se puede aplicar a todos los interruptores que protege el relé o solo a los que se desee de entre los que se están protegiendo (esta selección se realiza por medio del bloque RelLogdip asociado).

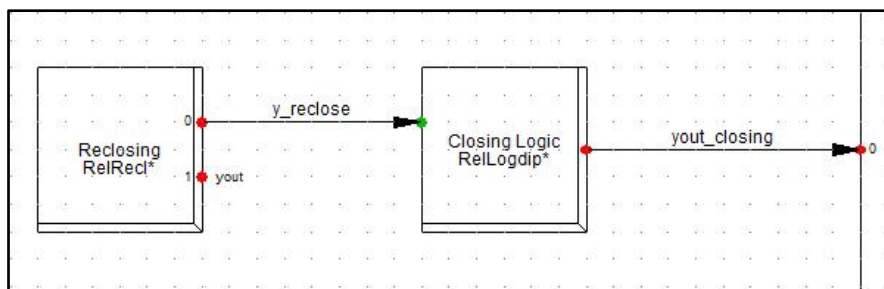


Figura 23. Diagrama de bloques de la unidad de reenganche y carga fría.

## ENSAYO DE FUNCIONES

Para el ensayo de las diferentes funciones implementadas en los relés se han utilizado simulaciones dinámicas y estáticas. Principalmente se ha utilizado la siguiente red de 50Hz:

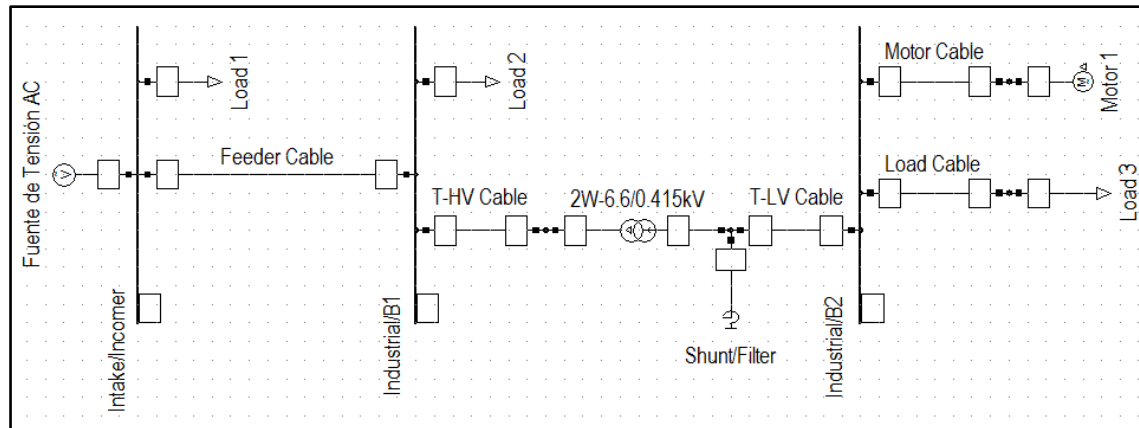


Figura 24. Red utilizada en los ensayos de las protecciones [8].

Se trata de una red con dos niveles de tensión diferentes y consta de los siguientes elementos:

- Fuente de tensión AC: tensión nominal de 6.6kV.
- Transformador trifásico:
  - Potencia nominal: 0.75MVA.
  - Grupo de conexión: Dyn1. Se ha extraído el neutro del secundario para poder medir corrientes en la puesta a tierra. Neutro rígido a tierra.
  - Relación de transformación: 6.6/0.415kV.
  - Impedancia de cortocircuito: 7%.
  - Pérdidas en el cobre: 4kW.
- Carga 1: Carga trifásica de 2MW de potencia nominal.
- Carga 2: Carga trifásica de 1.5MW de potencia nominal.
- Carga 3: Carga trifásica de 0.1MW de potencia nominal.
- Motor 1: Motor asíncrono de 102kW de potencia nominal con un factor de potencia de 0.8.

Se han realizado numerosos ensayos con los relés. Por una parte encontramos los ensayos destinados a comprobar si la implementación de las funciones es correcta (los cuales se presentan en esta memoria) y por otra parte se encuentran los ensayos cuyo fin es comprobar que todas las unidades de todos los relés funcionen, es decir, que todos los bloques reciben correctamente las señales y emiten los disparos.



En total se ha comprobado el funcionamiento del siguiente número de unidades:

<b>Tipo de unidad</b>	<b>Número de unidades</b>
Unidades diferenciales	42
Unidades diferenciales instantáneas	42
Unidades de sobretensión de fase	10
Unidades de sobretensión de neutro	10
Unidades de subtensión de fase	10
Unidades de sobrefrecuencia	20
Unidades de subfrecuencia	20
Unidades de derivada de frecuencia	20
Unidades de sobreexcitación	5
Unidades de fallo de interruptor	16
Unidades de faltas restringidas	34
Unidades de sobreintensidad instantánea de fase	57
Unidades de sobreintensidad instantánea de secuencia inversa	32
Unidades de sobreintensidad instantánea de neutro calculado	32
Unidades de sobreintensidad instantánea de puesta a tierra	32
Unidades de sobreintensidad instantánea de neutro sensible	4
Unidades de sobreintensidad temporizada de fase	38
Unidades de sobreintensidad temporizada de secuencia inversa	32
Unidades de sobreintensidad temporizada de neutro calculado	32
Unidades de sobreintensidad temporizada de puesta a tierra	32
Unidades de sobreintensidad temporizada de neutro sensible	4
Unidades de imagen térmica de fase	25
Unidades de imagen térmica de tierra	3
Unidades de sobreintensidad de terciario	4
Unidades de distancia	32
Unidades de fallo de fusible	2
Unidades de secuencia directa de bloqueo de fallo de fusible	2

**Tabla 6. Listado de los tipos y números de unidades ensayadas.**

Para los ensayos de implementación mostrados en la memoria se han utilizado los modelos de relé IDN G, IDV A, IDV E e IDV F.

Se han empleado varios métodos para comprobar el correcto funcionamiento y disparo de las unidades implementadas:

- Cálculo de cortocircuitos estático según la norma IEC60909: estudio de funciones de protección de corriente y distancia.
- Simulación de transitorios electromecánicos en función del tiempo (RMS): estudio de funciones de protección de tensión, frecuencia y diferencial.
- Simulación de transitorios electromagnéticos en función del tiempo (EMT): para el estudio de funciones de detección de armónicos.



En todos los ensayos realizados, el interruptor asociado a la protección se encuentra aguas abajo del relé con el fin de no perder la referencia de medida tras abrir el interruptor.

## **1. TRANSFORMADORES DE INTENSIDAD PARA MEDIDA**

### **1.1. Transformador trifásico**

Para la transformación de las intensidades que circulan por las tres fases de la red se han utilizado transformadores de intensidad conectados en estrella.

La relación de transformación para el lado de alta ha sido de 65A/1A mientras que en el secundario se ha necesitado una relación 1050A/1A.

Para calcular la intensidad nominal a cada lado del transformador y por lo tanto la relación de transformación necesaria se ha utilizado la siguiente formula:

$$I_N = S_N / (\sqrt{3} \cdot U_N) \quad (6)$$

Donde el significado de cada variable es:

$I_N$  Intensidad nominal del primario o secundario del transformador. (A)

$S_N$  Potencia nominal del transformador. (VA)

$U_N$  Tensión nominal del primario o secundario. (V)

El motivo de utilizar estas relaciones de transformación es que cuando circule la intensidad nominal del transformador en el primario o secundario, también tengamos la intensidad nominal en el relé.

### **1.2. Transformador monofásico**

También se han tenido que utilizar transformadores de intensidad monofásicos para la transformación de las intensidades que circulan por la puesta a tierra del transformador.

En este caso la relación de transformación elegida ha sido de 40A/1A dado que las intensidades circulantes producidas por las faltas serán relativamente bajas.

## **2. TRANSFORMADOR DE TENSIÓN PARA MEDIDA**

Para la medida de las tensiones se ha utilizado un transformador de tensión con una relación de 6600V/110V. Se ha empleado esta relación de transformación porque la medida se ha realizado en el lado de alta tensión del transformador.

El transformador es de una potencia de 4VA, una impedancia de 1 ohmio y un factor de potencia unitario. El transformador consta de conexión estrella en ambos arrollamientos.

### 3. ENSAYO DE UNIDADES DE FRECUENCIA

Dentro de los ensayos de las unidades de frecuencia se pueden distinguir cuatro tipos de simulaciones diferentes:

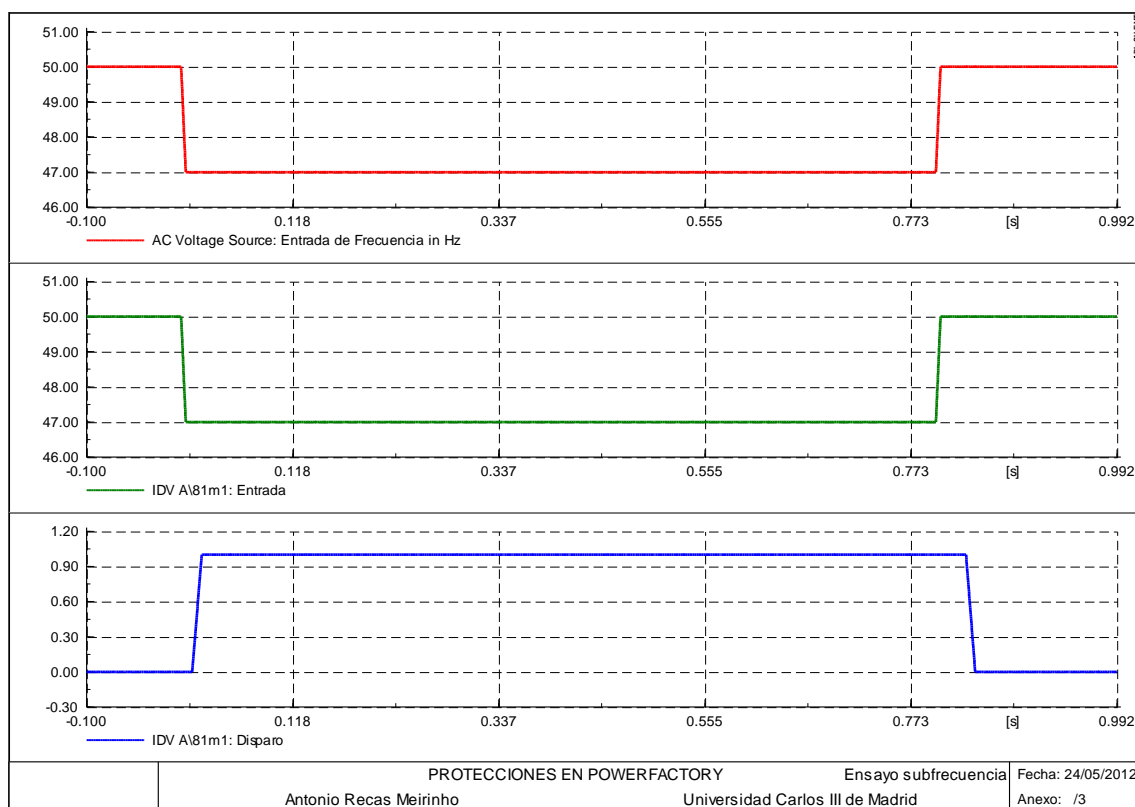
1. Ensayo de las unidades de mínima frecuencia o subfrecuencia
2. Ensayo de máxima frecuencia o sobrefrecuencia.
3. Ensayo de rampa de frecuencia o derivada de frecuencia.
4. Ensayo de la inhibición por baja tensión de las unidades de frecuencia.

Los ensayos anteriores se realizarán mediante la modificación de una señal de entrada de la fuente denominada F0Hz. Esta señal nos permite modificar la frecuencia de la tensión que entrega la fuente.

#### 3.1. Ensayo de subfrecuencia o mínima frecuencia

Para el ensayo de las unidades de subfrecuencia aplicaremos a la red un escalón de bajada de frecuencia en el segundo cero de la simulación y, posteriormente, a los 0.8 segundos de la simulación restauramos la frecuencia al valor previo al evento, 50Hz.

Las unidades de subfrecuencia están ajustadas para disparar por debajo de 48Hz y el escalón que aplicamos es una bajada de 50Hz a 47Hz. Posteriormente restauraremos la frecuencia a 50Hz nuevamente.



**Figura 25. Ensayo de unidades de subfrecuencia.**

En la figura 25 se pueden apreciar tres gráficas diferentes.

- En la primera gráfica se representa el escalón de frecuencia generado por la fuente.
- En la segunda gráfica se representa la entrada de frecuencia que recibe el relé.
- En la última gráfica se puede observar el disparo de la unidad de subfrecuencia.

La unidad está configurada con un retardo de disparo nulo (cero segundos) y un tiempo de arranque de 20 milisegundos, es por esto que la señal de disparo está ligeramente desplazada hacia la derecha con respecto a la entrada de frecuencia. La unidad se repone 10 milisegundos después de sobrepasar los 48Hz en el escalón de subida.

En el caso de configurar la unidad con un retardo de disparo diferente a cero segundos la señal de disparo se desplazaría este tiempo hacia la derecha con respecto al escalón de frecuencia.

### 3.2. Ensayo de sobrefrecuencia o máxima frecuencia

En este ensayo se ha aplicado un escalón de frecuencia inverso al anterior, es decir, de 50Hz pasamos a 53Hz y tras 0.8 segundos restauramos la frecuencia nuevamente a 50Hz. La unidad está preparada para disparar cuando se detecta una frecuencia superior a 52Hz.

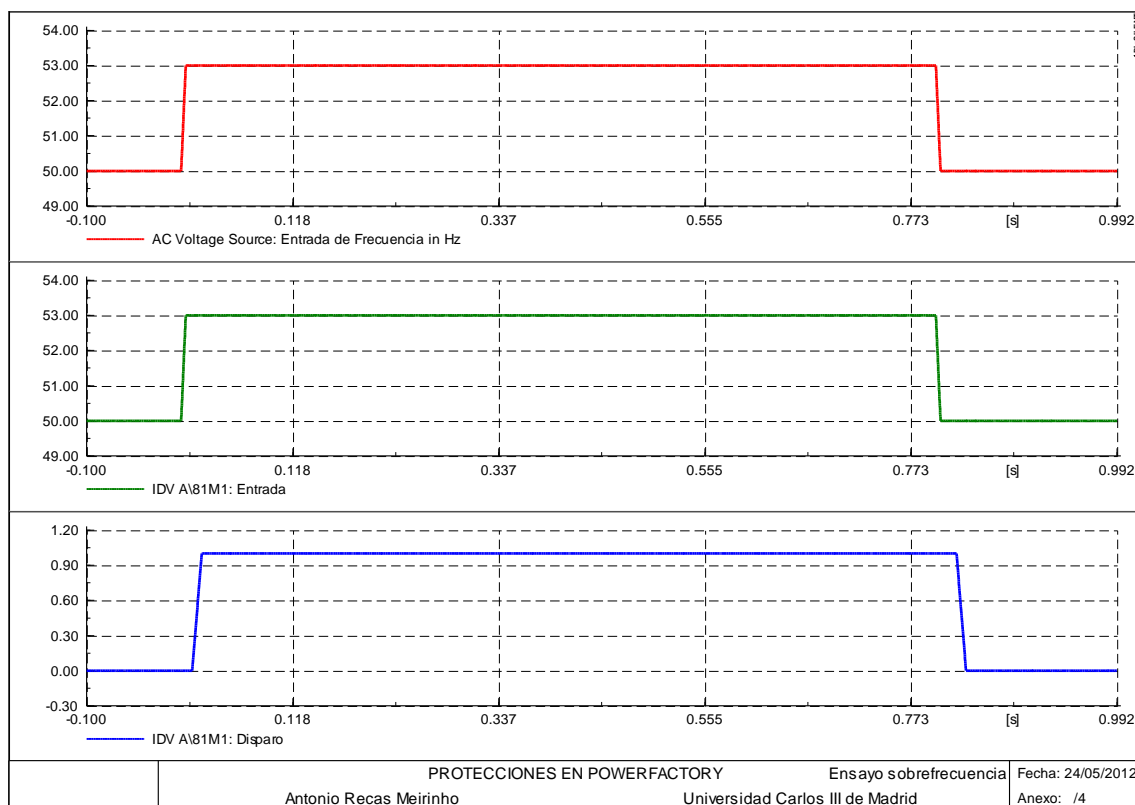


Figura 26. Ensayo de unidades de sobrefrecuencia.

Nuevamente en la figura 26 se pueden apreciar tres gráficas diferentes.

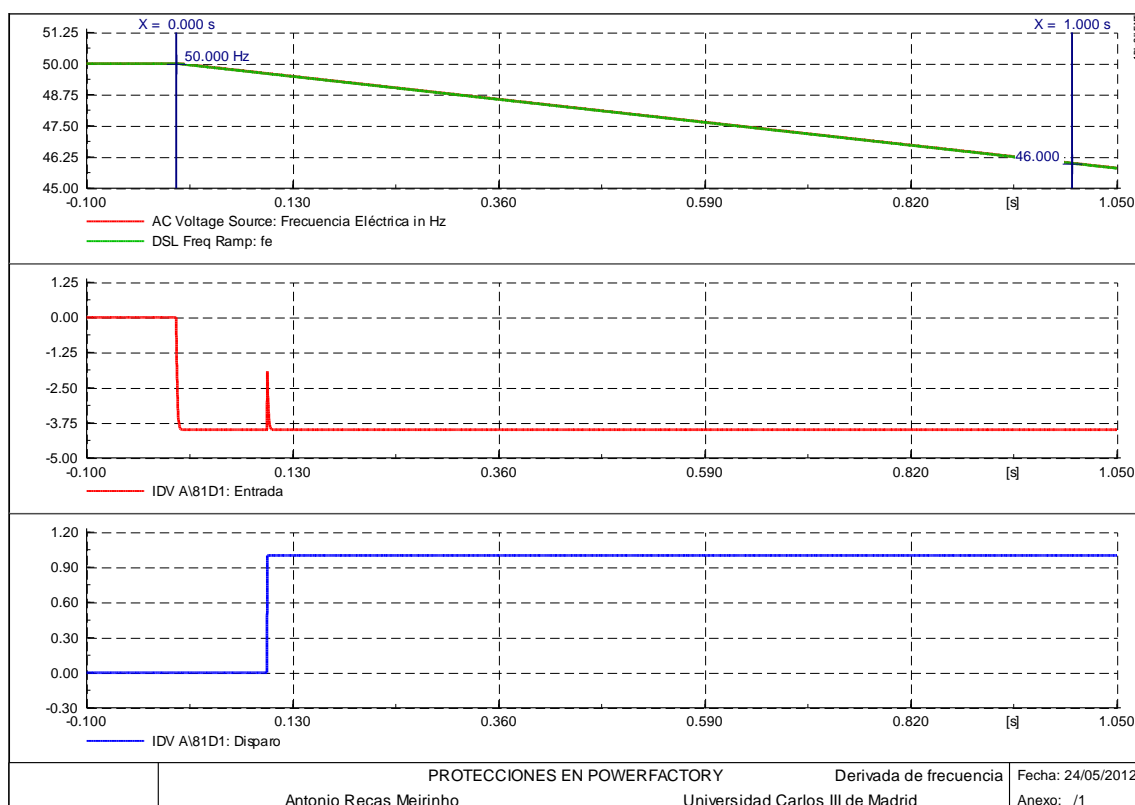
- En la primera gráfica se aprecia la variación de frecuencia aplicada a la red, pasando de 50Hz a 53 Hz. Tras 0.8 segundos se restaura la frecuencia a 50Hz.
- En la segunda gráfica se observa la variación de frecuencia que recibe la unidad de sobrefrecuencia.
- En la última gráfica se aprecia el disparo de la protección ante la variación de frecuencia.

En este ensayo la unidad también actúa con un tiempo de retardo de cero segundos.

### 3.3. Ensayo de rampa de frecuencia o derivada de frecuencia

Para el ensayo de las unidades de derivada de frecuencia modificaremos nuevamente la señal de entrada de la fuente de tensión denominada F0Hz, pero en este caso, en lugar de aplicar un escalón realizaremos una rampa de frecuencia con pendiente negativa.

Las unidades de frecuencia se han ajustado para disparar en caso de detectar una rampa de frecuencia superior a  $-3\text{Hz/s}$  y la rampa que se aplica es de  $-4\text{Hz/s}$ .



**Figura 27. Ensayo de unidades de derivada de frecuencia.**



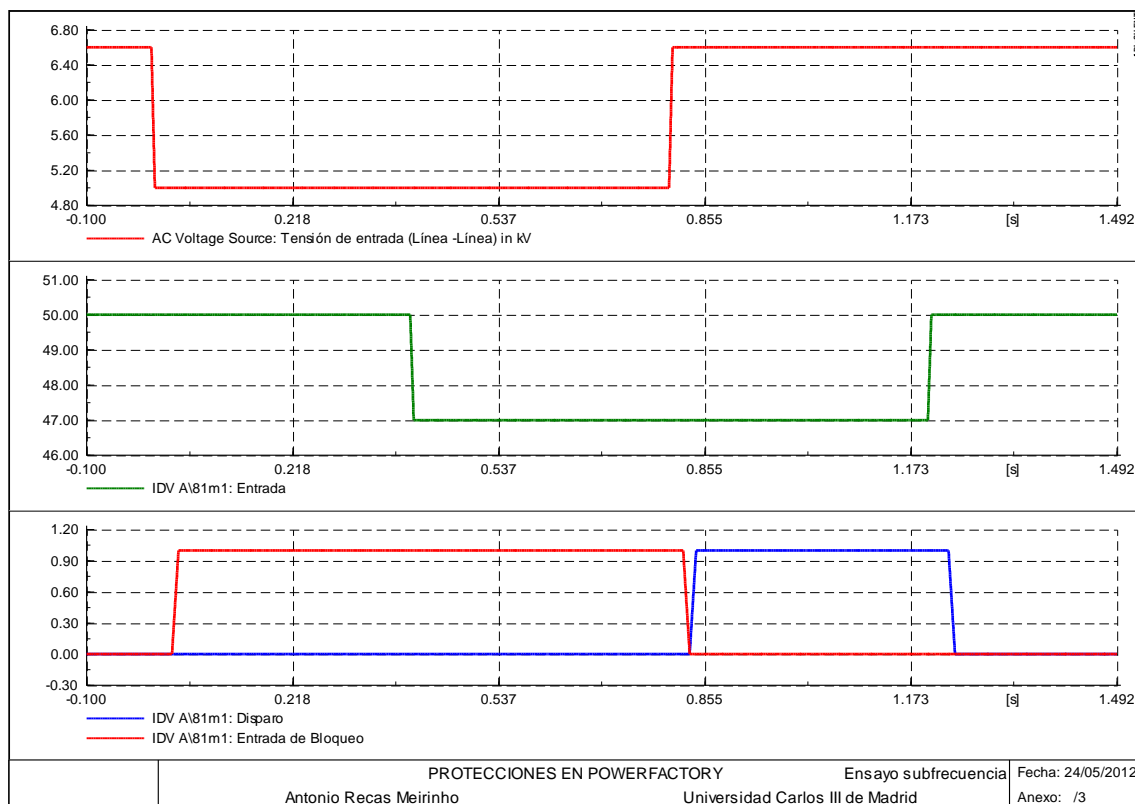
Las tres gráficas que podemos apreciar en la figura 27 son las siguientes:

- En la primera gráfica se encuentra la rampa de frecuencia aplicada en el instante cero de la simulación. Se han añadido dos líneas verticales para observar mejor la rampa de frecuencia. En un segundo la frecuencia disminuye 4Hz.
- En la segunda gráfica se muestra la señal que recibe la unidad de derivada de frecuencia. La unidad recibe 50Hz de manera constante hasta el instante inicial en el que se realiza el evento, en el cual pasa a detectar una entrada de -4Hz/s.
- Por último, en la tercera gráfica, aparece el disparo de la unidad 10 milisegundos después de sobrepasar los -3Hz/s.

Al retardo de disparo de la unidad hay que añadir el tiempo que el relé de medida de frecuencia emplea en calcular la frecuencia.

### 3.4. Bloqueo de unidades de frecuencia por mínima tensión

En este caso el ensayo consiste en probar si la inhibición por mínima tensión de las unidades de frecuencia funciona, para ello realizaremos una bajada de tensión a 5kV en el instante cero de la simulación con una reposición a los 0.8 segundos. A la vez se aplicará una bajada de frecuencia hasta 47Hz a los 0.4 segundos y se repondrá a 50Hz en el instante 1.2 segundos. El tiempo total de la simulación es de 1.5 segundos.



**Figura 28. Ensayo de la inhibición por baja tensión.**



La descripción de la figura 28 es la siguiente:

- En la primera gráfica se aprecia el escalón de tensión aplicado a la red.
- En la segunda gráfica se observa el escalón de frecuencia producido.
- En la tercera gráfica aparece el disparo de la unidad de baja frecuencia.

Cuando la tensión baja por debajo del ajuste establecido en la unidad de inhibición, se activa la señal de bloqueo que se envía a la unidad de baja frecuencia, y hasta que ésta no se restablece no permite que la unidad dispare. Una vez finalizado el evento de disminución de frecuencia se restablece el disparo de la unidad.

## 4. ENSAYO DE UNIDADES DE TENSIÓN

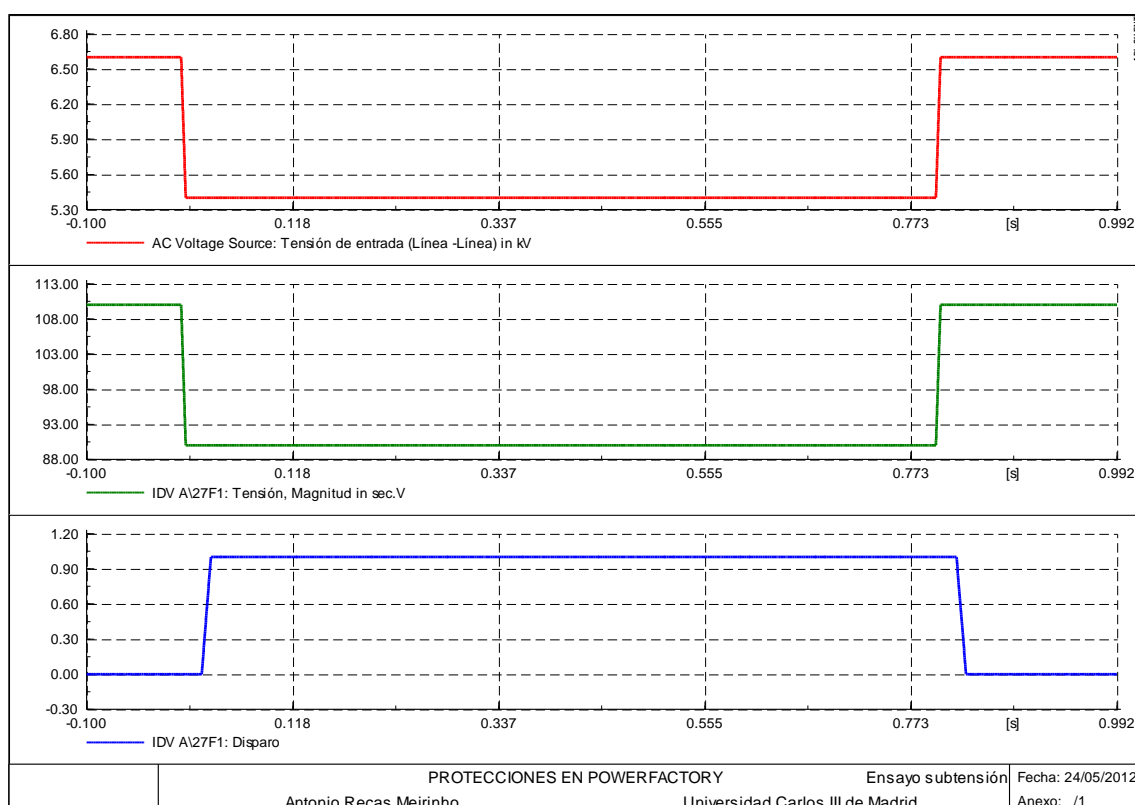
Hemos realizado tres ensayos diferentes.

1. Ensayo de las unidades de sobretensión.
2. Ensayo de las unidades de subtensión.
3. Ensayo de las unidades de sobretensión de neutro calculado.

Estos ensayos de tensión se realizarán modificando una señal de entrada de la fuente de tensión. Este parámetro se llama UI0 y nos permite modificar la tensión de línea que entrega. En los dos primeros casos las unidades de tensión actuarán sobre la tensión de línea en lugar de actuar sobre la tensión de fase, esto lo conseguimos mediante el selector de voltaje implementado en la protección.

### 4.1. Ensayo de subtensión

Para la subtensión de fase aplicaremos una bajada de tensión de 6.6kV a 5.4kV, lo que supone un descenso aproximado del 20% de la tensión nominal. La protección actúa con un tiempo de arranque de 20 milisegundos.



**Figura 29. Ensayo de la unidad de subtensión.**

En la figura 29 aparecen tres gráficas como en los ensayos anteriores:

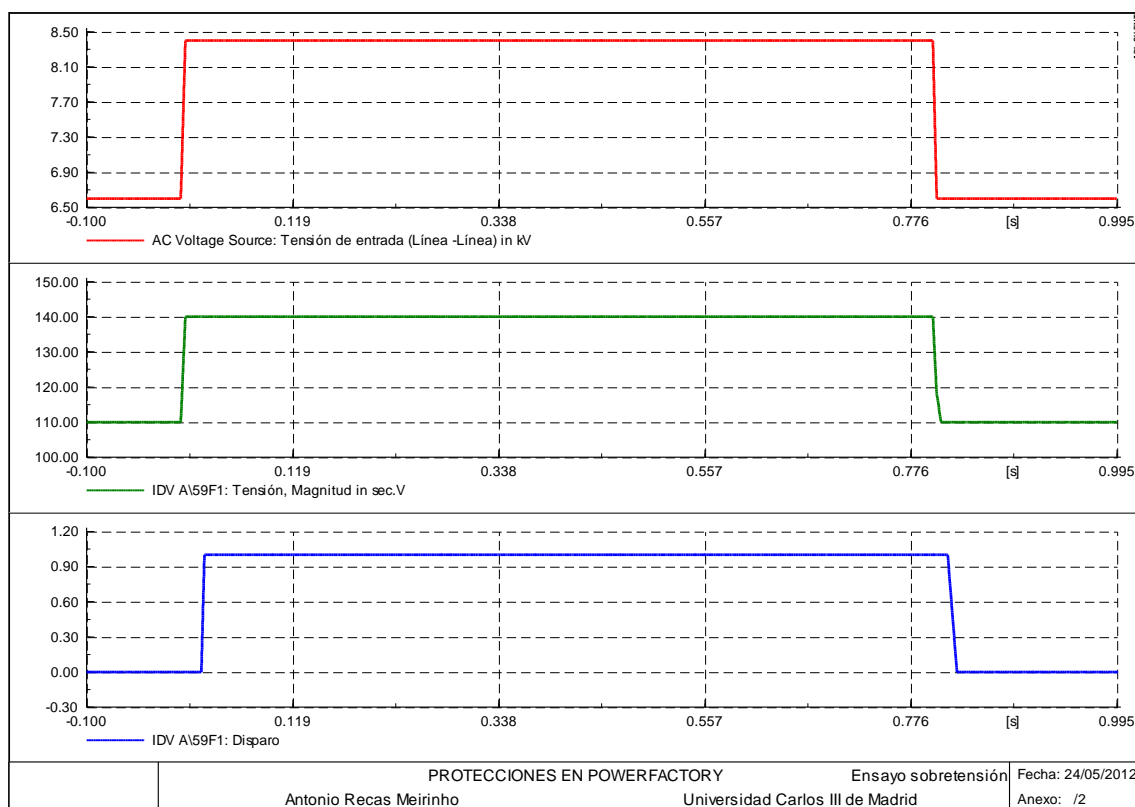
- En la primera gráfica aparece la bajada de tensión producida de 6.6kV a 5.4kV. Posteriormente a los 0.8 segundos se restaura el voltaje a su valor normal.

- En la segunda, vemos la variación de tensión que entra a la unidad de subtransmisión.
- En la última gráfica aparece la señal de disparo de la unidad.

Se puede observar como al descender la tensión por debajo del ajuste de 100V secundarios, la unidad de baja tensión tarda 20 milisegundos en emitir el disparo. Una vez finalizada la bajada de tensión la unidad se repone.

## 4.2. Ensayo de sobretensión

Para comprobar el funcionamiento de las unidades de sobretensión aplicamos una subida de tensión de 6.6kV a 8.4kV, lo cual supone un incremento del 27% respecto a la tensión nominal. Tras 0.8 segundos se elimina la sobretensión.



**Figura 30. Ensayo de la unidad de sobretensión.**

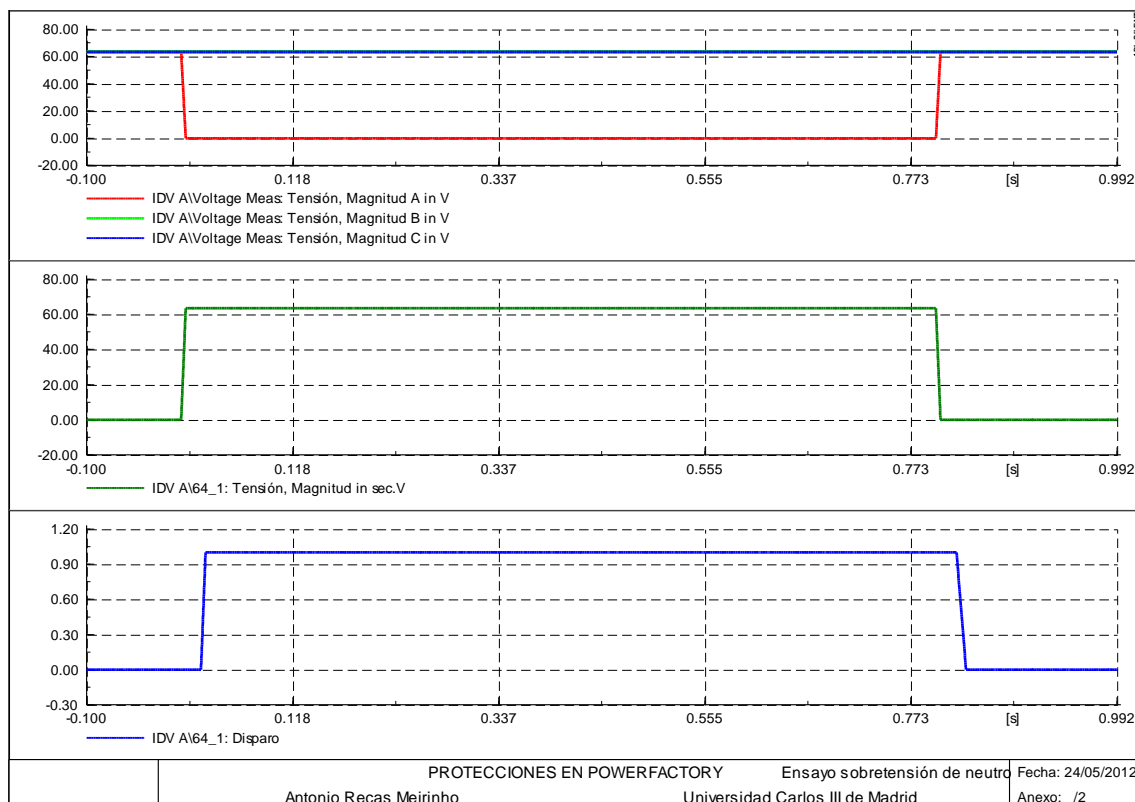
En la figura 30 nuevamente podemos apreciar tres gráficas:

- En la primera aparece la sobretensión aplicada a la red.
- En la segunda gráfica vemos la variación de tensión que entra a la unidad
- En la tercera aparece el disparo de la unidad así como su reposición.

La unidad estaba preparada para disparar en caso de detectar una sobretensión por encima de 120V secundarios. Tanto el disparo como su reposición se llevan a cabo con un tiempo de 20 milisegundos una vez detectada la falta.

### 4.3. Ensayo sobretensión de neutro calculado

Para el ensayo de estas unidades de sobretensión se realiza un cortocircuito monofásico, posteriormente tras 0.4 segundos despejamos el cortocircuito. El objetivo es desequilibrar las tensiones y producir una tensión homopolar distinta de cero.



**Figura 31. Ensayo de la unidad de sobretensión de neutro calculado.**

La descripción de las tres gráficas que se pueden apreciar en la figura 31 es la siguiente:

- En la primera gráfica aparece la tensión de cada fase que detecta el relé. Atendiendo a esta gráfica se puede observar que la falta monofásica se ha producido en la fase A.
- En la segunda gráfica aparece la tensión de secuencia homopolar que recibe la unidad de sobretensión de neutro calculado.
- Por último, en la tercera gráfica se representa el disparo de la unidad.

La unidad de sobretensión de neutro está ajustada para disparar en caso de detectar una tensión homopolar superior a 20V. En este caso la falta provoca una sobretensión de 54.97V por lo cual la protección actúa con un tiempo de 20ms en el arranque y se repone 30ms después de detectar que la falta desaparece.

## 5. ENSAYO DE UNIDADES DE SOBREINTENSIDAD

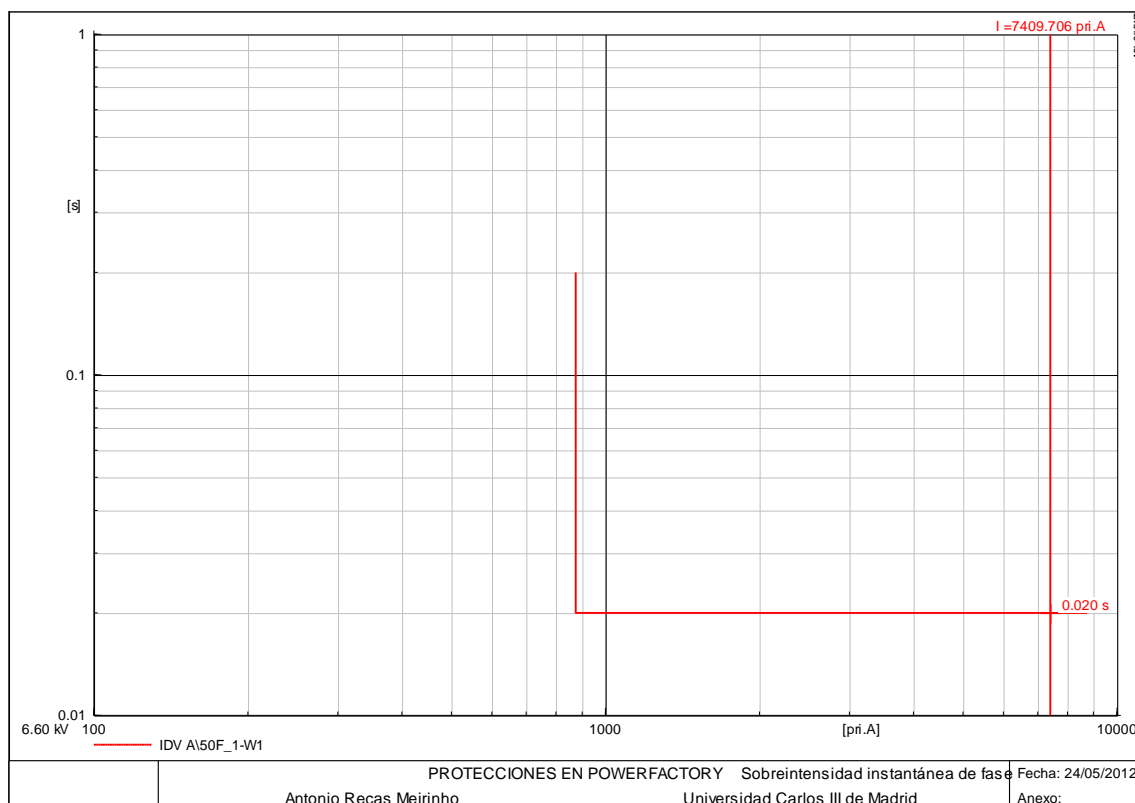
Este conjunto de ensayos podemos dividirlo en ensayos de unidades de sobreintensidad instantáneos y unidades de sobreintensidad temporizadas. Dentro de cada grupo podemos ver las unidades de sobreintensidad de fase, de neutro, de tierra, de secuencia inversa, etc.

### 5.1. Ensayo de unidades de sobreintensidad instantánea

Estas unidades disparan de forma instantánea sin seguir ninguna curva, siempre disparan en el mismo tiempo si la corriente se encuentra por encima del valor de ajuste

#### 5.1.1. Unidades de sobreintensidad instantáneas de fase

Para comprobar que las unidades de sobreintensidad instantáneas de fase funcionan correctamente, realizaremos un cortocircuito trifásico al 25% de la línea según la normativa IEC60909 con una resistencia de falla de 0.1 ohmios y una reactancia de 0.1 ohmios. La unidad está configurada para disparar en un tiempo de 20 milisegundos si se detecta una intensidad superior a 5A secundarios.

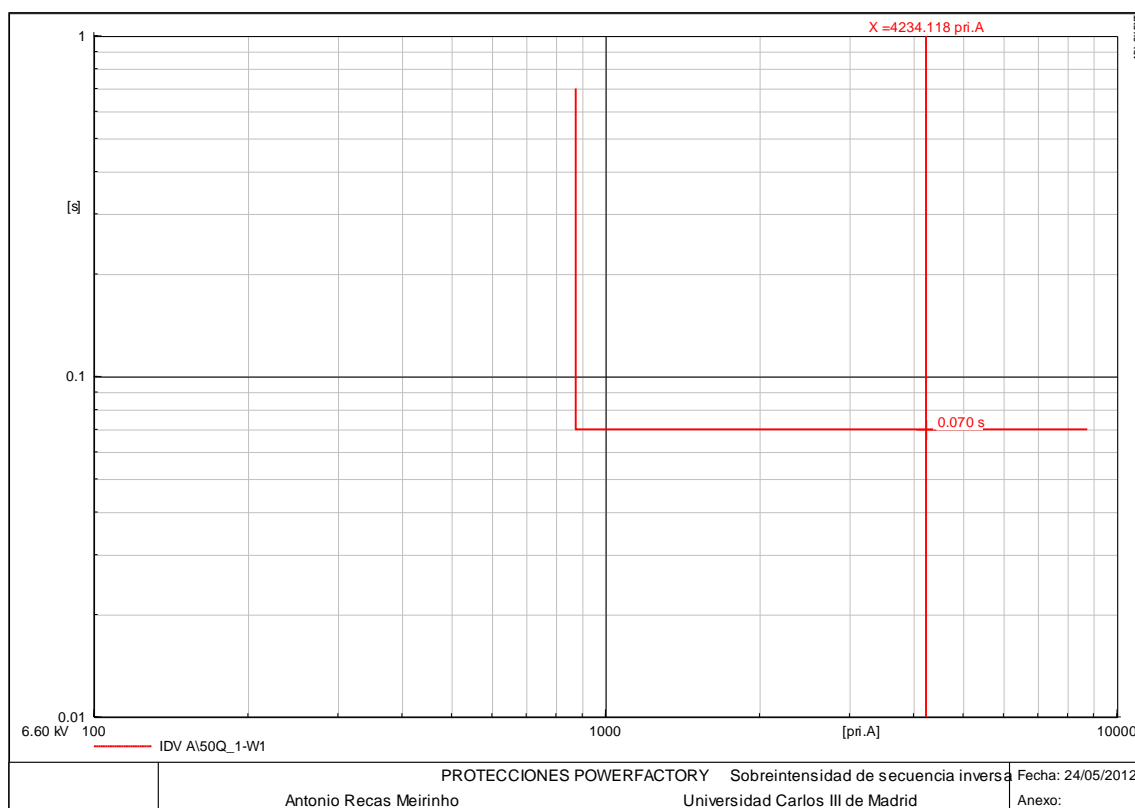


**Figura 32. Gráfica tiempo-sobreintensidad de la unidad de fase.**

Como se puede ver en la figura 32, el cortocircuito genera una intensidad de 7409.7A, lo que supone 42.34A secundarios. Dado que se supera el valor de corriente ajustado el disparo es correcto.

### 5.1.2. Unidades de sobreintensidad instantáneas de secuencia inversa

Para este ensayo de unidades de secuencia inversa, llevamos a cabo un cortocircuito bifásico según la normativa IEC60909 al 25% de la línea con una resistencia de falla de 0.1 ohmios y una reactancia de 0.1 ohmios. La unidad está ajustada con una intensidad de disparo de 5A secundarios con un tiempo de arranque de 20 milisegundos y un retardo de disparo de 50 milisegundos, lo que da un tiempo total de actuación de 70 milisegundos.



**Figura 33. Gráfica tiempo-sobreintensidad de la unidad secuencia inversa.**

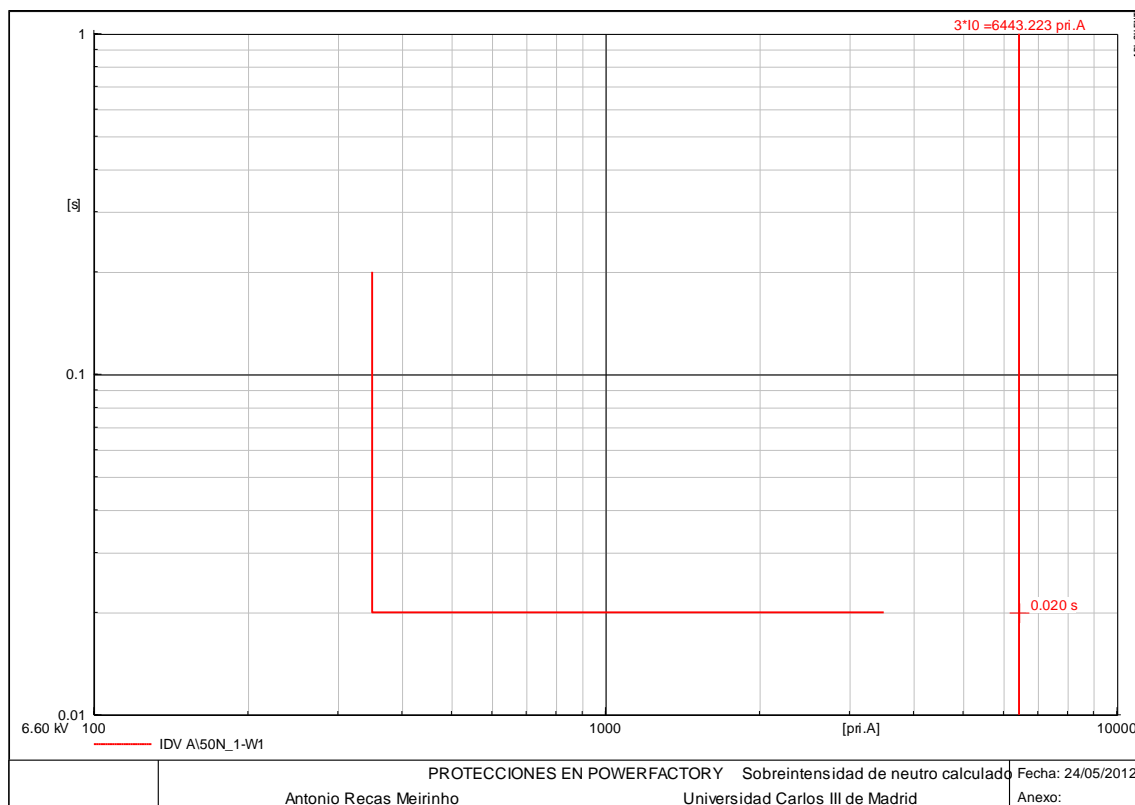
Como se puede apreciar en la figura 33, la falta bifásica produce una corriente de 4234.118A que vistos en el relé suponen 24.19A. Dado que la corriente es superior a la intensidad de disparo ajustada, la unidad emite una señal de disparo.

### 5.1.3. Unidades de sobreintensidad instantánea de neutro calculado

Para probar estas unidades se ha realizado un cortocircuito monofásico con la finalidad de desequilibrar las corrientes trifásicas equilibradas y que de esta forma aparezca una intensidad homopolar distinta de cero. Estas unidades pueden ser direccionales, disparando en cualquier dirección, sólo hacia delante, o sólo hacia detrás.

#### 5.1.3.1. Disparo hacia delante.

Para realizar un disparo cuando la falta se encuentre hacia delante del transformador de intensidad configuraremos la unidad para disparar únicamente en esta dirección. Realizamos un cortocircuito monofásico según la normativa IEC60909 al 10% de la línea con una resistencia de falla de 0.1 ohmios y una reactancia también de 0.1 ohmios. La unidad está configurada con una intensidad de disparo de 2A y con un tiempo de arranque de 20 milisegundos.



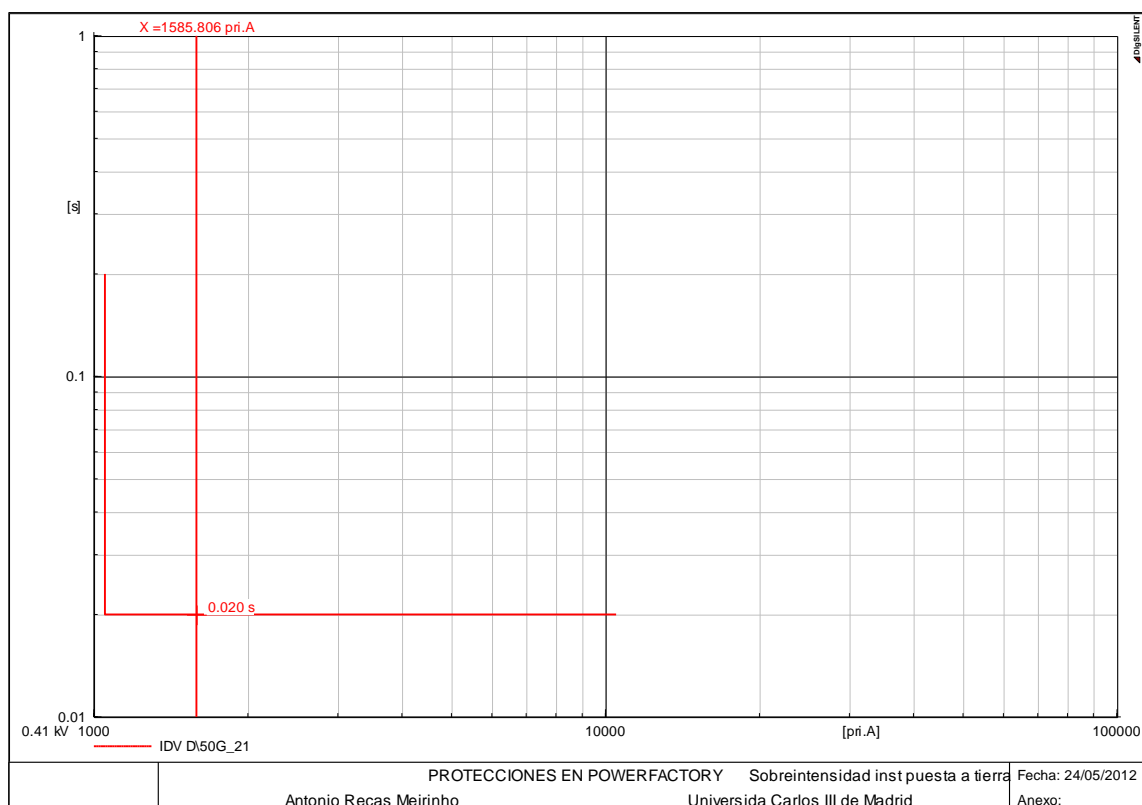
**Figura 34. Gráfica tiempo-sobreintensidad de la unidad de neutro calculado.**

La falta genera una intensidad de 6443.223A primarios que vistos en el secundario se transforman en 36.81A. La unidad direccional detecta que la falta se está produciendo delante, por lo que envía la señal “forward” a la unidad de sobreintensidad de neutro. Puesto que se recibe la señal de disparo en el sentido en el que la unidad está configurada y se supera el nivel de intensidad de paso ajustada, la protección dispara en un tiempo de 20 milisegundos.



#### 5.1.4. Unidades de sobreintensidad instantánea de puesta a tierra.

Este ensayo se realizará en el secundario del transformador de la red puesto que ese es el devanado en el cual podemos medir la puesta a tierra. Para ello realizaremos un cortocircuito monofásico según la normativa IEC60909 con una resistencia de falta de 0.1 ohmios y una reactancia también de 0.1 ohmios. La unidad está configurada con una intensidad de disparo de 1A y con un ajuste de tiempo de 20 milisegundos.

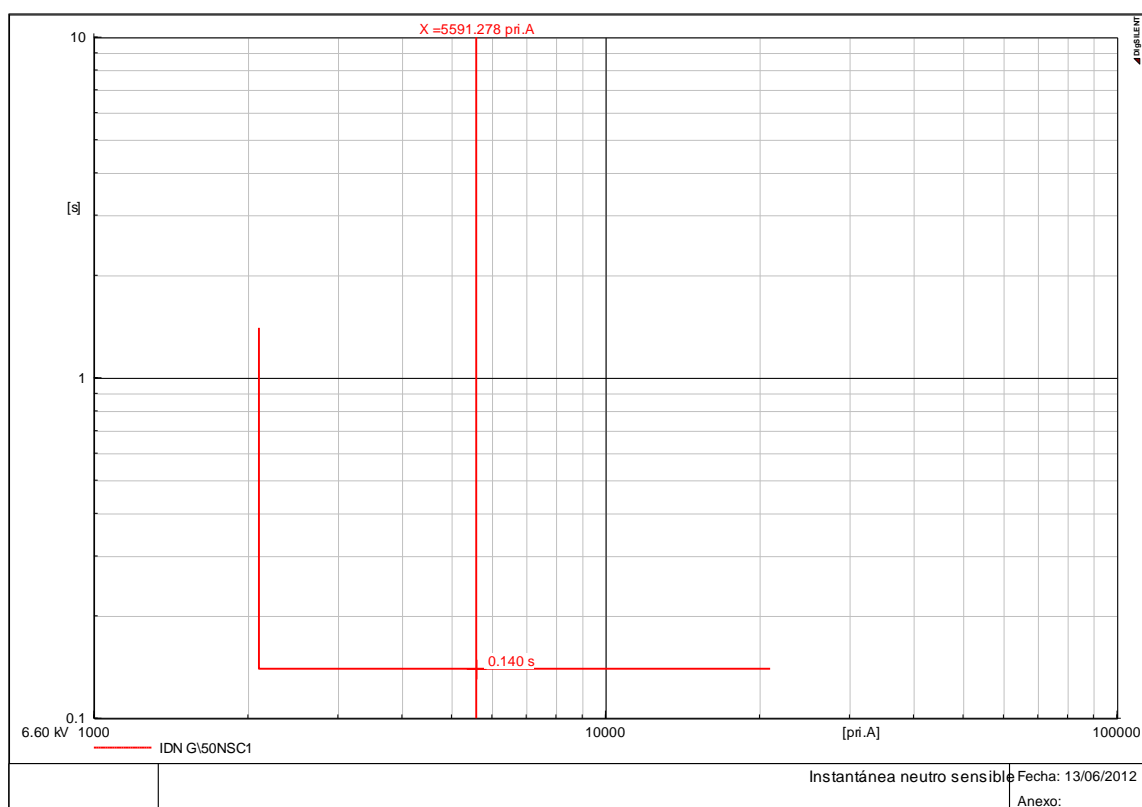


**Figura 35. Gráfica tiempo-sobreintensidad de la unidad de tierra.**

Como se aprecia en la figura 35, la falta provoca la circulación de 1585.806A por la puesta a tierra, lo que supone 1.51A en el relé. Puesto que se supera la intensidad de disparo, la unidad activa la señal de disparo.

### 5.1.5. Unidades de neutro sensible.

Para este ensayo utilizaremos el transformador de intensidad monofásico con relación de transformación 1050/1A y lo situaremos en el lado de alta tensión del transformador a proteger. Realizaremos un cortocircuito monofásico según la normativa IEC60909 con una resistencia de falta de 0.2 ohmios y una reactancia de 0.3 ohmios. La unidad está configurada con una intensidad de disparo de 2A y con un ajuste de tiempo de 0.14 segundos.



**Figura 36. Gráfica tiempo-sobreintensidad de la unidad de neutro sensible.**

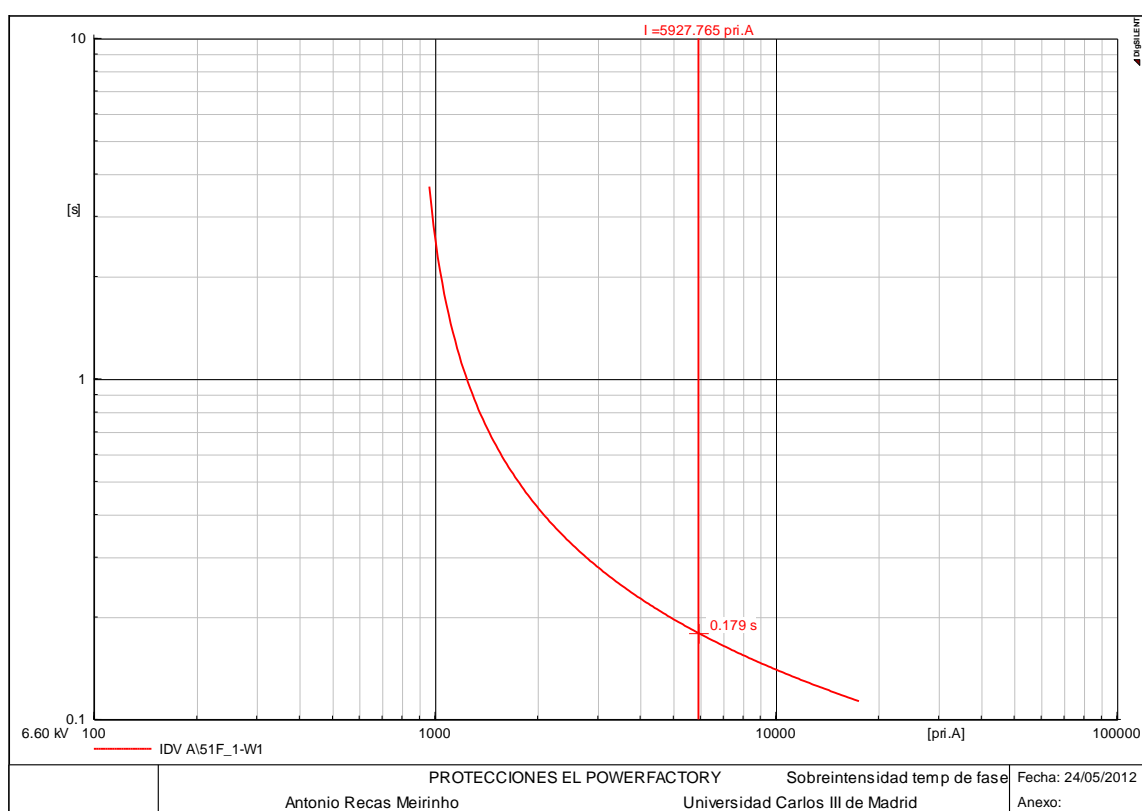
Como se aprecia en la figura 36, la falta provoca la circulación de 5591.278A por el neutro, lo que supone 5.325A en el relé. Puesto que la intensidad que circula es superior al ajuste de disparo, la unidad emite la señal de disparo.

## 5.2. Ensayo de unidades de sobreintensidad temporizada

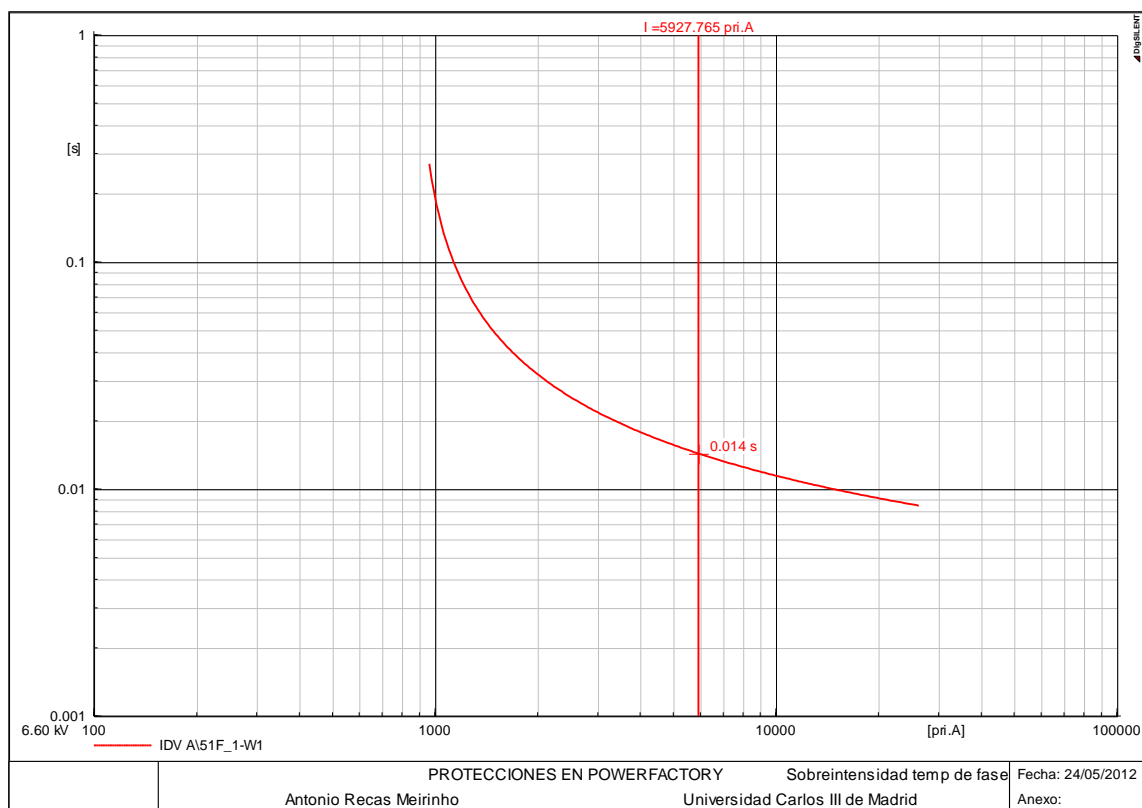
En este conjunto de ensayos, a parte de los realizados en el apartado anterior, hay que añadir el de las imágenes térmicas.

### 5.2.1. Unidades de sobreintensidad temporizada de fase

En este caso mostraremos dos ensayos para poder apreciar correctamente la diferencia de tiempo de disparo al utilizar una característica de disparo u otra. En ambos ensayos el cortocircuito se realizara según la normativa IEC60909 al 25% de la línea con una impedancia y resistencia de falta de 0.2 ohmios.



**Figura 37. Gráfica tiempo-sobreintensidad de la unidad temporizada de fase, ensayo 1.**



**Figura 38. Gráfica tiempo-sobreintensidad de la unidad temporizada de fase, ensayo 2.**

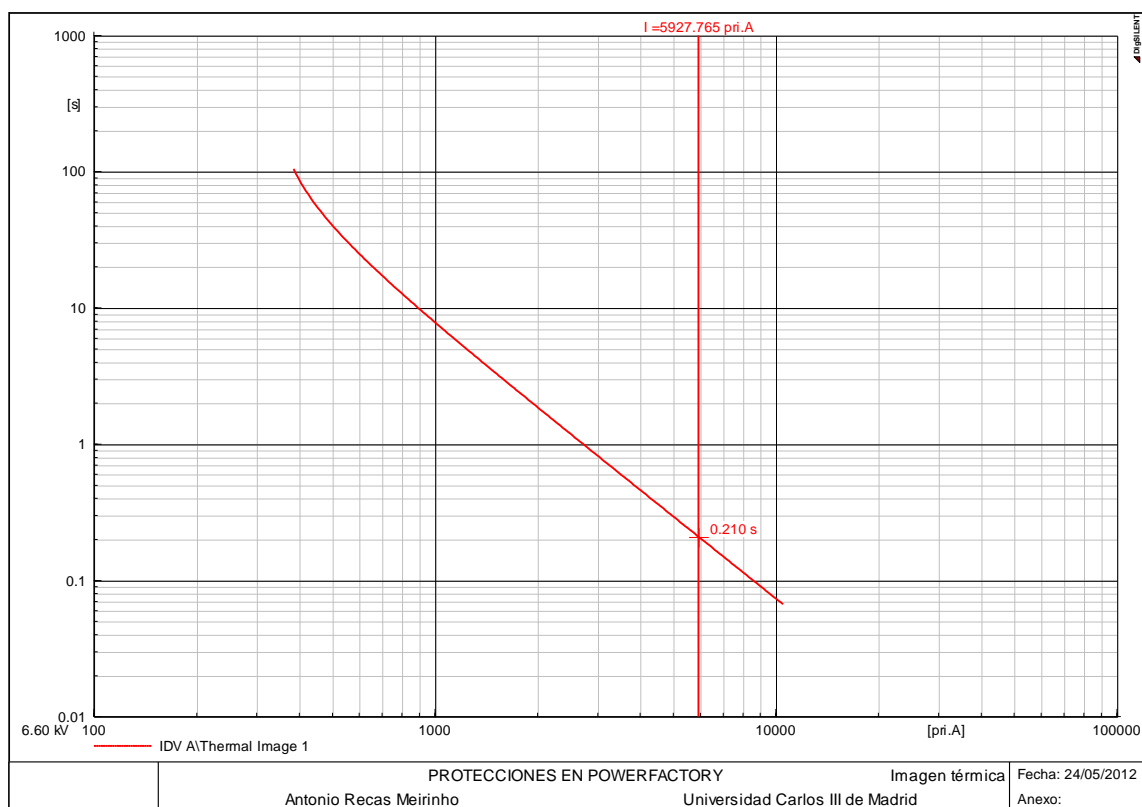
El cortocircuito realizado genera una intensidad de 5927.765A que vistos en el relé en ambos casos son 33.87A.

En el primer caso se utiliza una curva IEC normal inversa sin límite de tiempo con un dial de 0.05 segundos y una intensidad de disparo de 5A. Dado que la corriente que circula por la línea es superior al valor ajustado, la protección dispara en 0.179 segundos.

Para el segundo ensayo la curva utilizada es una ANSI Moderadamente inversa sin límite de tiempo, con el mismo dial de tiempo que el ensayo anterior, 0.05 y una intensidad de disparo de 5A. Nuevamente la protección dispara, pero esta vez en un tiempo muy inferior: 0.014 segundos.

### 5.2.2. Unidades de imagen térmica

Para la imagen térmica emplearemos un cortocircuito trifásico según la normativa IEC60909. Esta falta se realizará al 50% de la longitud de la línea con una resistencia e impedancia de 0.3 ohmios, generando 5927.765A en la red que vistos desde el relé suponen 33.87A.

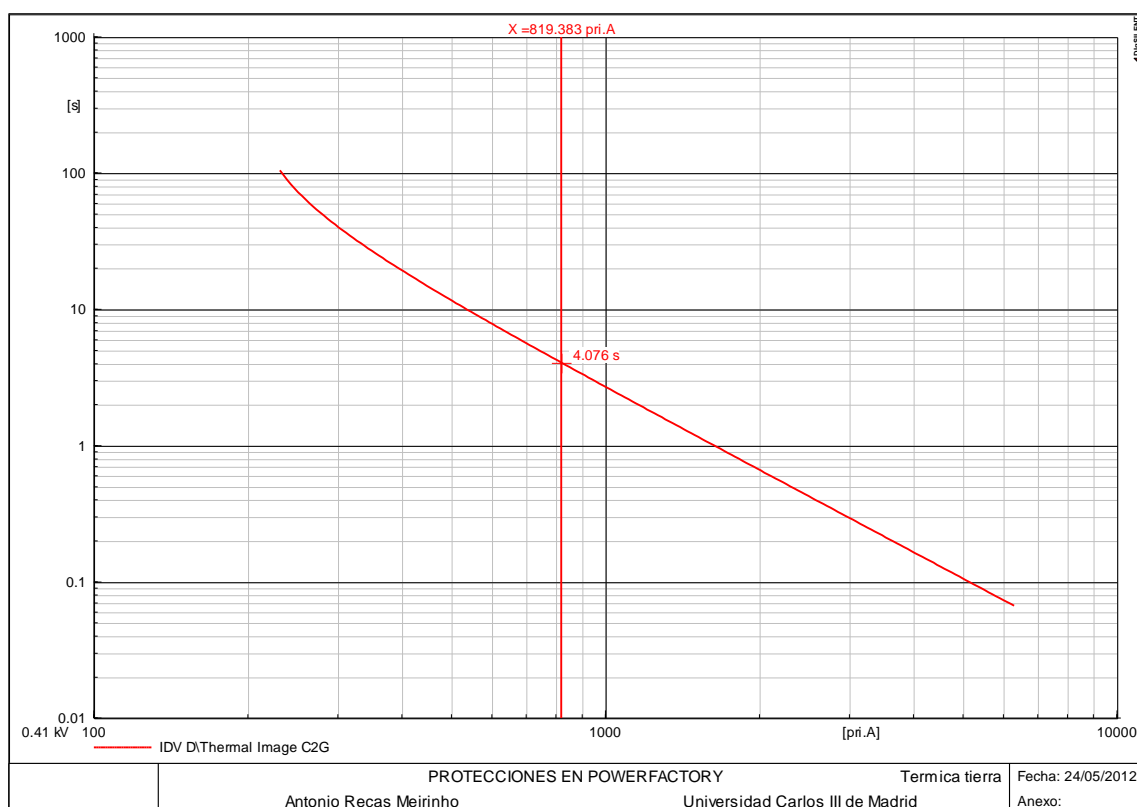


**Figura 39. Gráfica tiempo-sobreintensidad de la unidad de imagen térmica de fase.**

La unidad está configurada con una intensidad de arranque de 2A y un dial de tiempo de 1. Podemos apreciar en la figura 39 que la protección actúa ante la falta con un tiempo de 0.210 segundos puesto que se trata de un nivel de intensidad elevado.

Para apreciar mejor la diferencia de tiempo de disparo en función de la intensidad de falta, también ensayaremos las unidades térmicas de puesta a tierra implementadas. En este caso se realizará un cortocircuito monofásico en el secundario del transformador. Los valores de resistencia e impedancia de fallo en este caso son de 0.2 ohmios en ambos casos.

La unidad está preparada para disparar por encima de 0.2A secundarios con un dial de tiempo de 1.

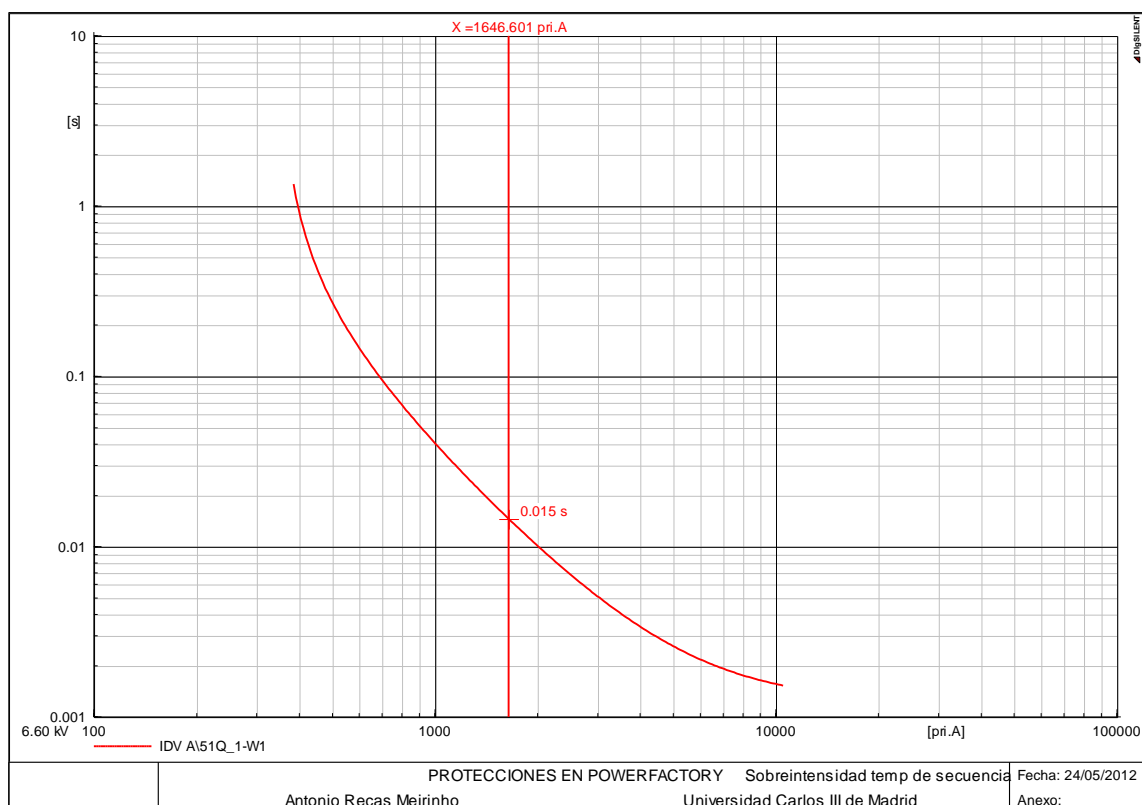


**Figura 40. Gráfica tiempo-sobreintensidad de la unidad de imagen térmica de puesta a tierra.**

Debido a la falta se produce la circulación de una intensidad de 819.383A primarios que en el secundario son 0.7A. En este caso el tiempo de disparo aumenta considerablemente dado que la intensidad producida por la falta es mucho menor. La unidad dispara en un tiempo de 4.076 segundos.

### 5.2.3. Unidades de sobreintensidad temporizada de secuencia inversa

Para comprobar el funcionamiento de las unidades de sobreintensidad temporizada de secuencia inversa realizamos un cortocircuito bifásico según la normativa IEC60909 al 25% de la línea con una impedancia de falla de 0.3 ohmios. La unidad se ajusta con una intensidad de disparo de 2A, un dial de tiempo de 0.05 y el disparo sigue una característica ANSI Extremadamente inversa.

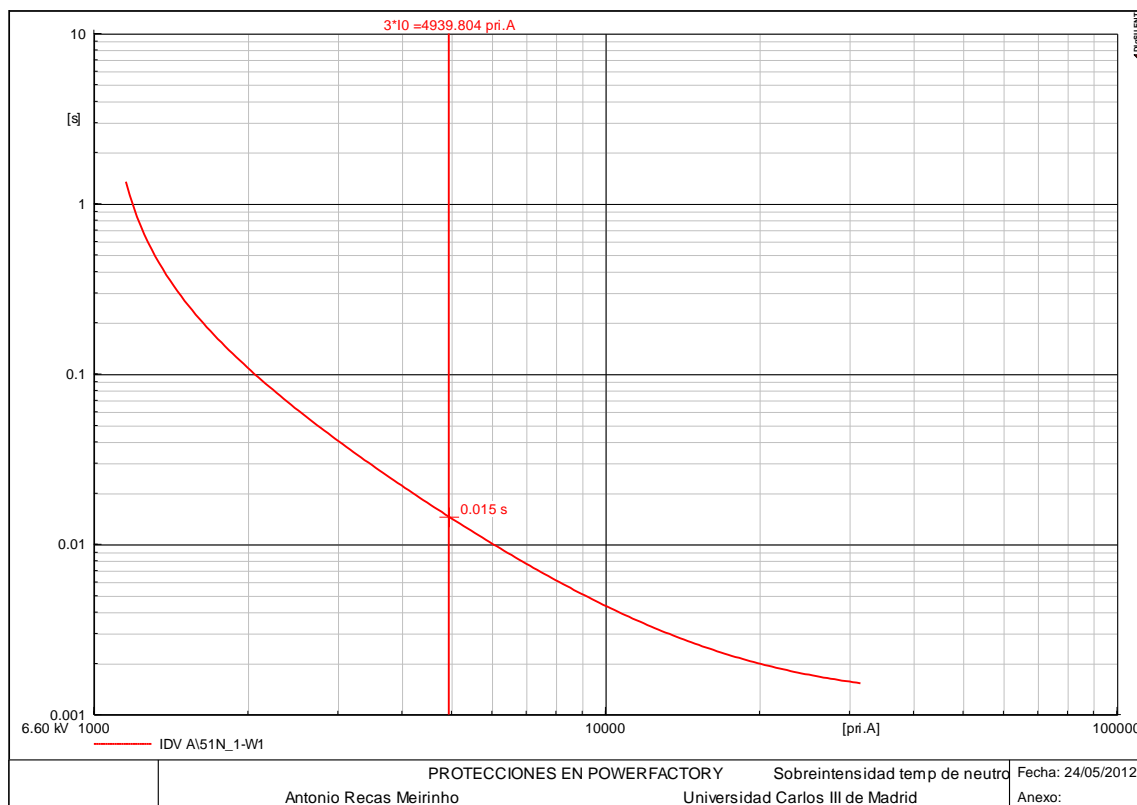


**Figura 41. Gráfica tiempo-sobreintensidad de la unidad temporizada de secuencia inversa.**

En la falta producida en la figura 41 podemos apreciar que circula una intensidad en el primario de 1646.601A, lo que supone una intensidad secundaria de 9.4A. Puesto que el valor de la corriente es superior al ajuste la protección dispara, concretamente en un tiempo de 0.015 segundos.

#### 5.2.4. Unidades de sobreintensidad temporizada de neutro calculado

En este ensayo se realizará un cortocircuito monofásico con una impedancia de falta de 0.3 ohmios. La unidad tiene un ajuste de intensidad de disparo de 6A secundarios y un dial de tiempo de 0.05. La característica de disparo es una ANSI Extremadamente Inversa.



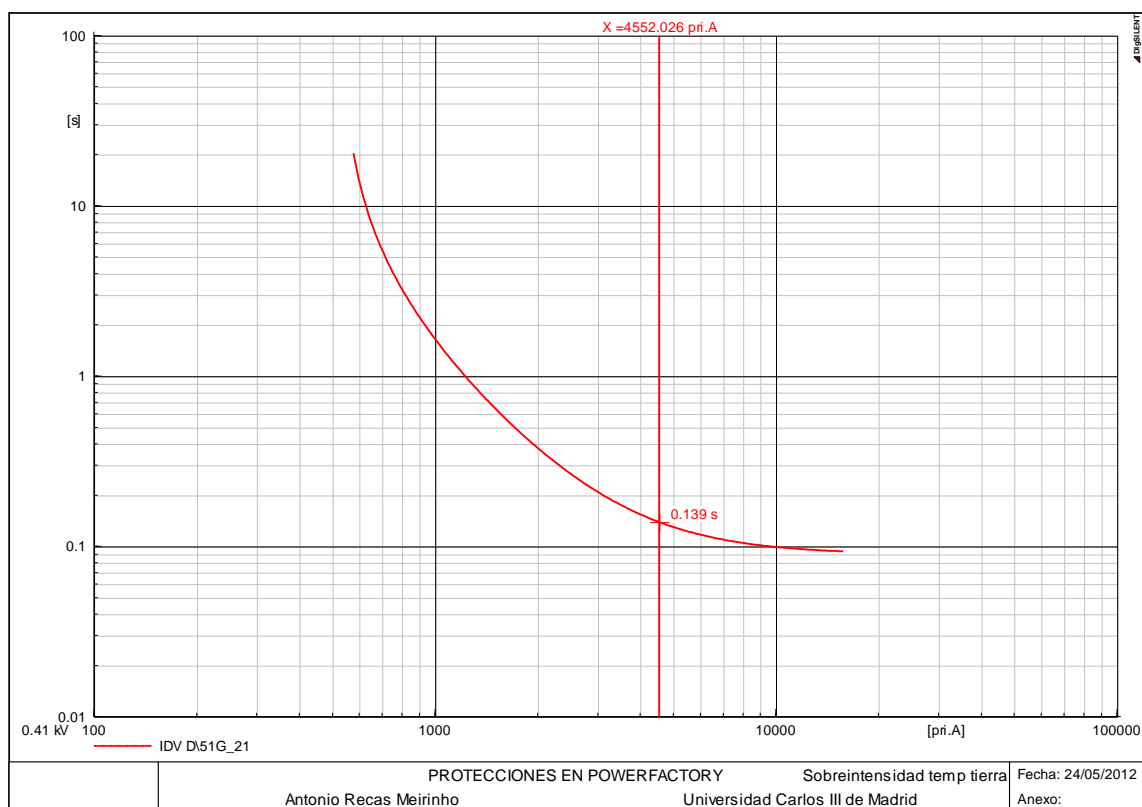
**Figura 42. Gráfica tiempo-sobreintensidad de la unidad temporizada de neutro calculado.**

Puesto que debido a la falta se produce una circulación de intensidad de 4939.804A primarios, que suponen 28.22A aproximadamente en el secundario, la unidad emite una señal de disparo en 0.015 segundos.



### 5.2.5. Unidades de sobreintensidad temporizadas de puesta a tierra

En este ensayo se realizará un cortocircuito monofásico según la normativa IEC60909 en el secundario del transformador, con una resistencia de falta de 0.05 ohmios. La unidad se configura con una curva ANSI Inversa, un ajuste de corriente de 0.5A secundarios y un dial de tiempo de 0.05.

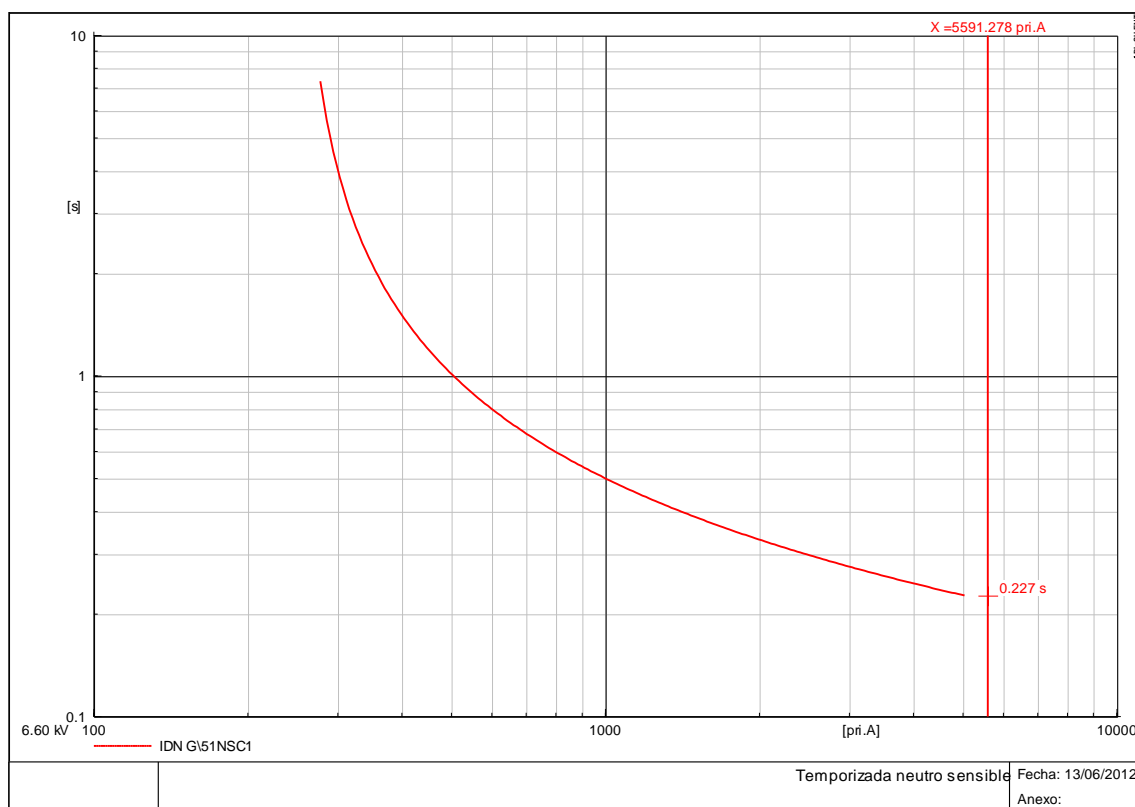


**Figura 43. Gráfica tiempo-sobreintensidad de la unidad temporizada de puesta a tierra.**

La falta provoca la circulación de una intensidad de 4552.026A primarios que suponen 4.33A secundarios. Al superarse la intensidad de arranque la unidad activa la señal de disparo.

### 5.2.6. Unidades de sobreintensidad temporizadas de puesta a tierra

En este ensayo se realizará un cortocircuito monofásico según la normativa IEC60909 en el primario del transformador, con una resistencia de falta de 0.2 ohmios y una reactancia de 0.3 ohmios. La unidad se configura con una curva IEC Normal Inversa, un ajuste de corriente de 0.25A secundarios y un dial de tiempo de 0.1.



**Figura 44. Gráfica tiempo-sobreintensidad de la unidad temporizada de neutro sensible.**

La falta provoca la circulación de una intensidad de 5591.278A primarios que suponen 5.32A secundarios. Al superarse la intensidad de arranque establecida, la unidad de sobreintensidad activa la señal de disparo para abrir los interruptores asociados en un tiempo de 0.227 segundos.

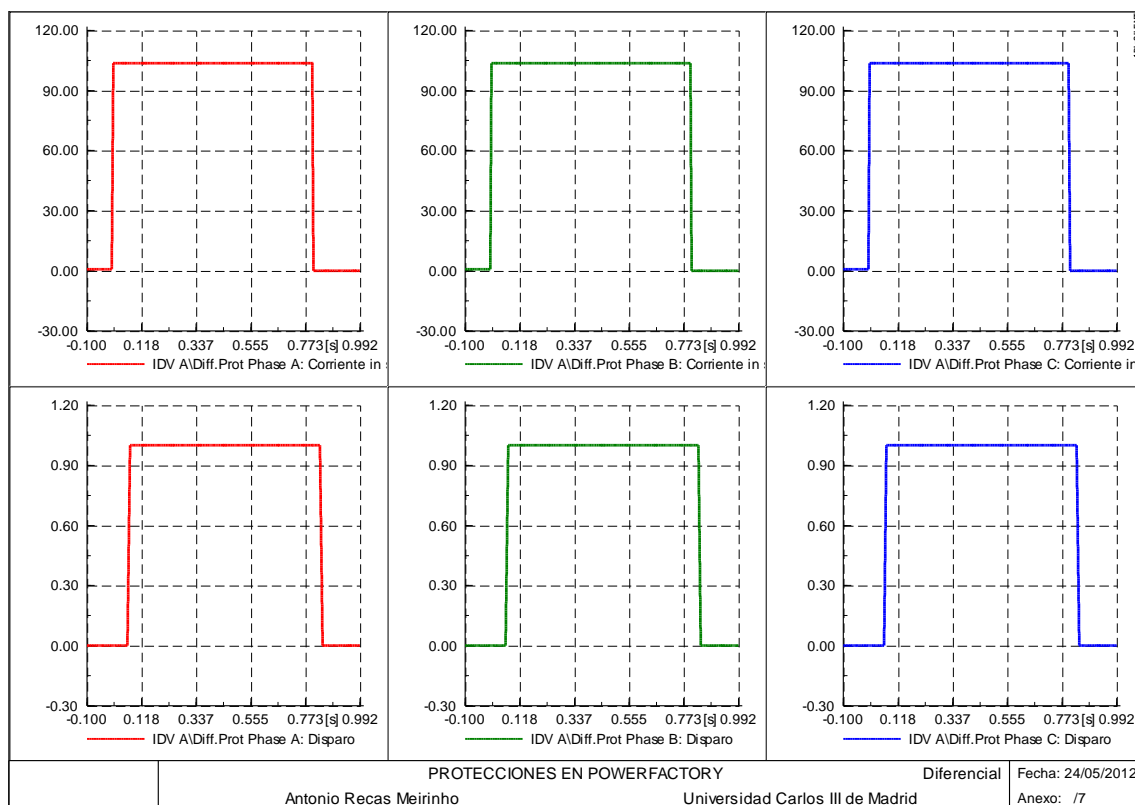
## 6. ENSAYO DE LA UNIDAD DIFERENCIAL

Para la protección diferencial haremos una simulación dinámica de un evento de cortocircuito en la zona interna de protección de los TI (es decir, entre ellos). La impedancia de falta será nula.

Dado que la falta se produce en la zona de protección detecta una intensidad diferencial de 103.63A secundarios en las tres fases. La unidad está configurada con los siguientes parámetros:

- Sensibilidad: 2.5A.
- Porcentaje de frenado para la pendiente uno: 20%.
- Porcentaje de frenado para la pendiente dos: 40%.
- Tiempo total de disparo: 0.055 segundos.

Puesto que la falta produce una intensidad diferencial que supera estos ajustes la protección emite la señal de disparo como se aprecia en la figura 45.



**Figura 45. Gráfica de disparo de la unidad diferencial con frenado.**

Una vez despejado el cortocircuito, la unidad se repone en un tiempo de 20 milisegundos.

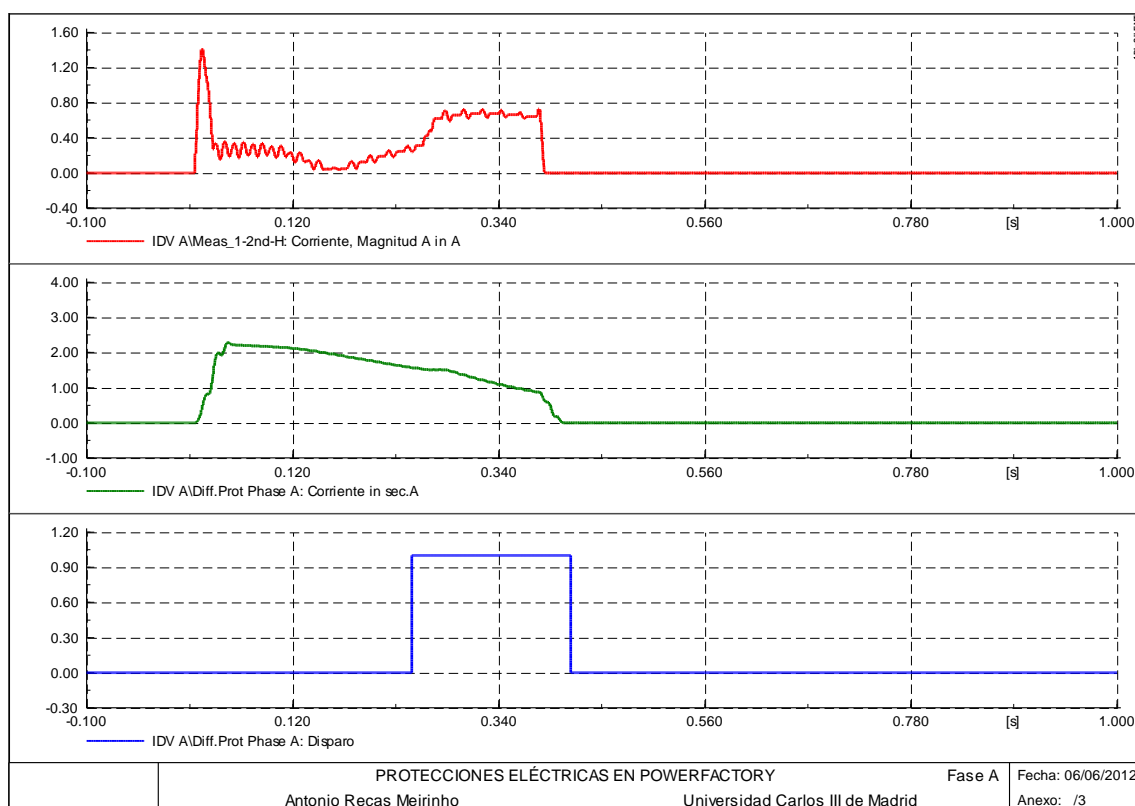
## 6.1. Ensayo de bloqueo por armónicos

La misión de este ensayo es probar el funcionamiento del bloqueo por armónicos implementado en la unidad diferencial.

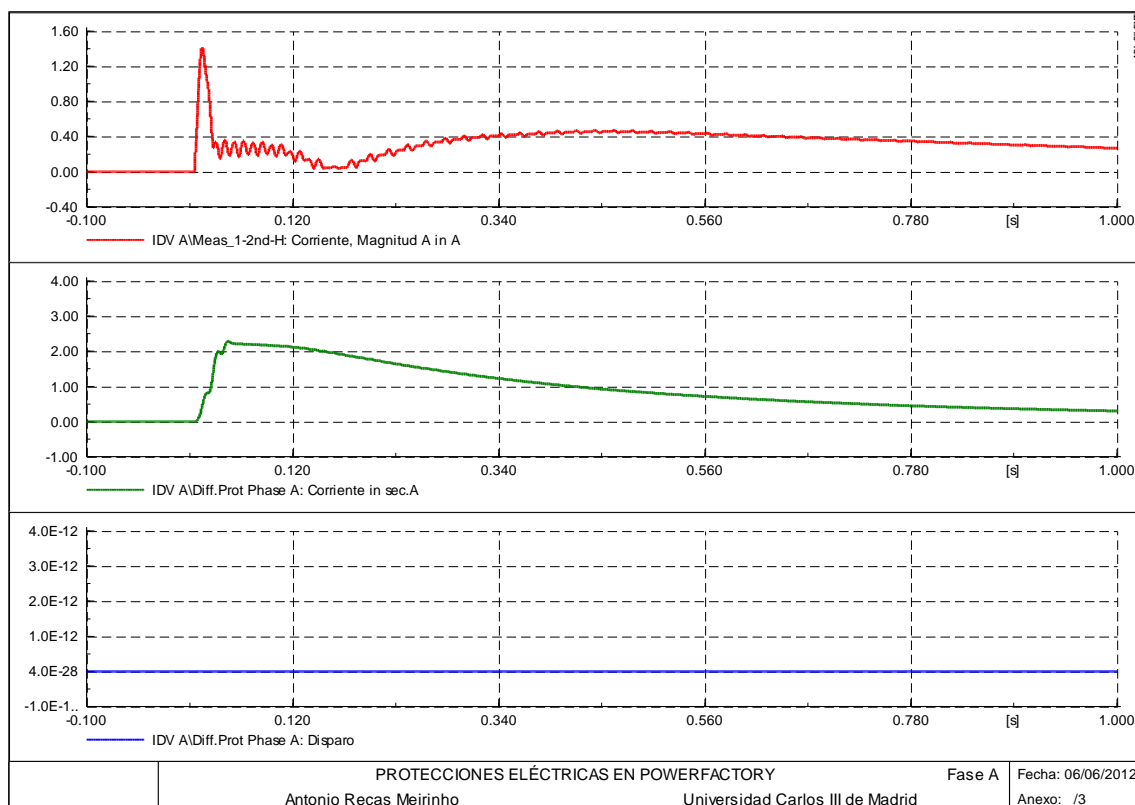
Para ello emplearemos una red diferente a la utilizada en el resto de ensayos, en la cual únicamente tendremos una fuente y un transformador (no habrá cargas). En esta simulación realizaremos una energización del transformador de tal forma que se genere una intensidad diferencial con contenido armónico, para lo que aumentaremos el flujo remanente del transformador de 1 p.u. a 1.295 p.u. En este caso los ajustes de la protección diferencial son los siguientes:

- Sensibilidad: 0.375A.
- Porcentaje de frenado para la pendiente uno: 20%.
- Porcentaje de frenado para la pendiente dos: 40%.
- Tiempo total de disparo: 0.225 segundos.
- Bloqueo por segundo armónico: 5%.

Realizaremos dos ensayos para poder apreciar la diferencia entre la unidad diferencial sin bloqueo por armónicos y con el activado:



**Figura 46. Ensayo de energización con unidad diferencial sin bloqueo por armónicos.**



**Figura 47. Ensayo de energización con unidad diferencial con bloqueo por armónicos.**

Tanto en la figura 46 como en la figura 47 podemos apreciar tres gráficas diferentes:

- En rojo: intensidad de segundo armónico que se genera durante la energización del transformador.
- En verde: intensidad diferencial que se genera durante la energización.
- En azul: señal de disparo de la unidad diferencial.

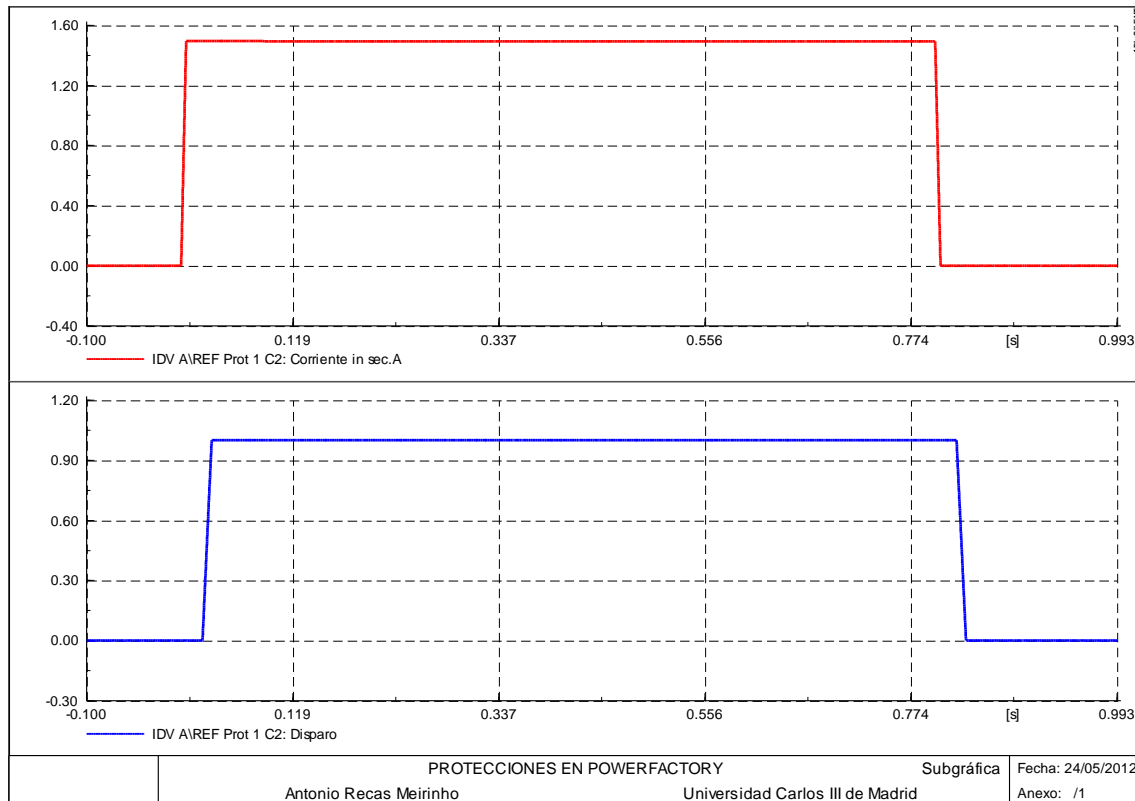
Como se puede observar el resultado de ambos ensayos es completamente diferente.

En el primer ensayo (figura 46) la unidad detecta una intensidad diferencial que sobrepasa el ajuste de intensidad diferencial y de frenado y por lo tanto emite la señal de disparo, interrumpiendo la energización del transformador.

Por otra parte, en el ensayo de la figura 47 se aprecia la misma intensidad diferencial pero sin embargo, al detectarse un contenido de segundo armónico superior al 0.01% respecto a la intensidad de frecuencia nominal, la unidad se bloquea y no dispara permitiendo de este modo la energización completa del transformador.

## 7. ENSAYO DE LA UNIDAD DE FALTAS A TIERRA RESTRINGIDAS

Para comprobar el funcionamiento de esta unidad se realizará una simulación dinámica de un evento de corto monofásico en el lado de baja tensión del transformador, con una impedancia de falta de 0.1 ohmios.



**Figura 48. Gráfica de la unidad de faltas a tierra restringidas.**

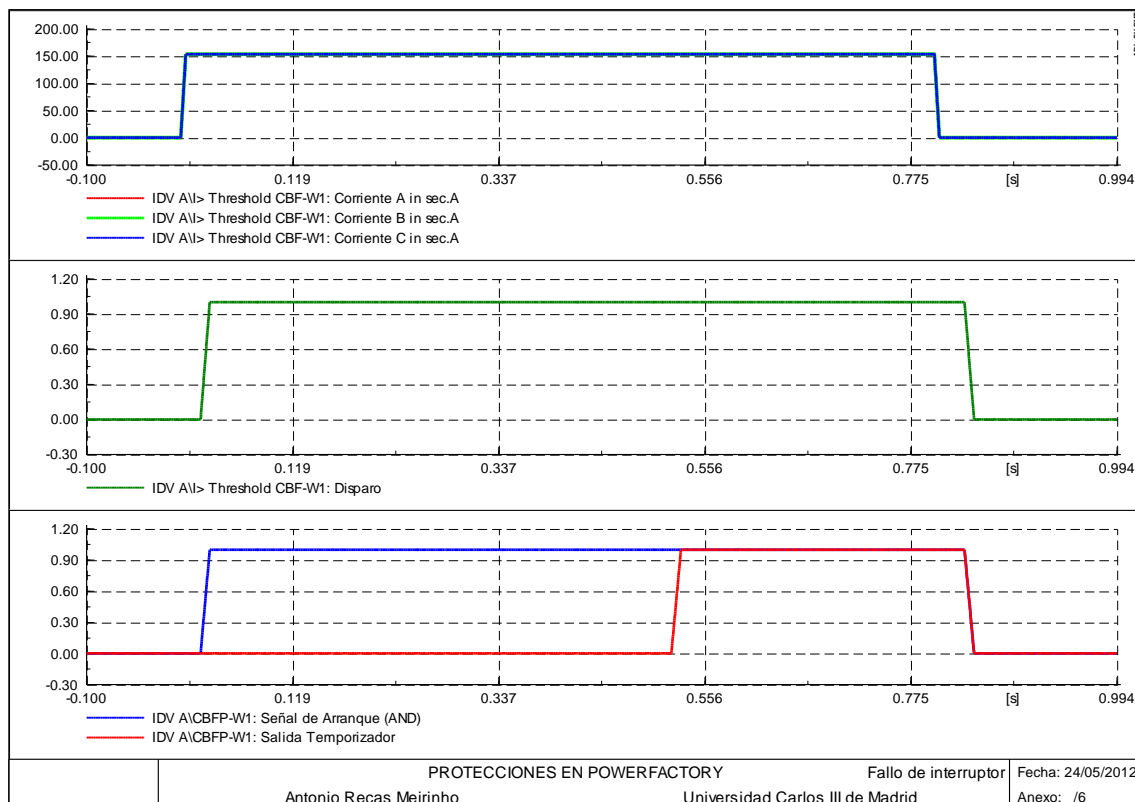
En la figura 48 podemos apreciar dos gráficas:

- En la primera se observa la intensidad diferencial que aparece debido al cortocircuito producido en el devanado secundario del transformador.
- En la segunda gráfica aparece la señal de disparo de la unidad de faltas a tierra restringidas.

Al producirse la falta aparece una intensidad diferencial de 1.494A secundarios, por lo que la protección emite la señal de disparo hasta que se despeja el cortocircuito.

## 8. ENSAYO DE LA UNIDAD DE FALLO DE INTERRUPTOR

El ensayo de la unidad de fallo de interruptor requiere una ligera modificación de relé. Dado que no se puede programar un evento de fallo de interruptor eliminaremos la salida lógica del relé y dejaremos únicamente la señal de disparo de la función de fallo de interruptor. En este caso realizaremos un cortocircuito trifásico en el instante cero de la simulación y despejaremos la falta a los 800 milisegundos.



**Figura 49. Gráfica de disparo de la unidad de fallo de interruptor.**

En la figura 49 podemos apreciar tres gráficas diferentes:

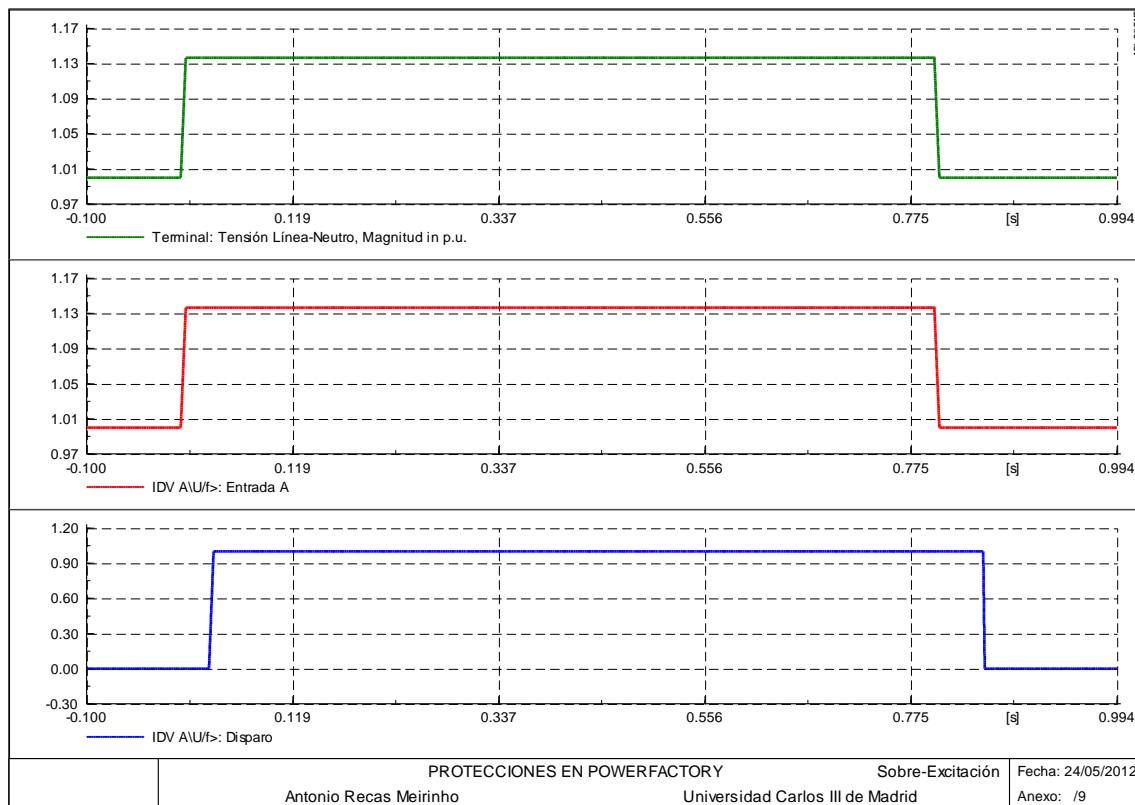
- La primera gráfica nos muestra el incremento de las intensidades de línea desde su valor nominal (1A) hasta aproximadamente 150A secundarios.
- En la segunda gráfica se aprecia el disparo de la unidad de sobreintensidad de la protección de fallo de interruptor.
- En la última gráfica se encuentra el temporizador de la función de fallo de interruptor. En esta gráfica se aprecia como la señal de arranque se pone a uno tan pronto como se recibe la señal de detección de la falta por parte de alguna de las unidades del relé. Tras activarse la señal de arranque se inicia la temporización de 500 milisegundos para despejar la falta por medio de esta unidad.

## 9. ENSAYO DE LA UNIDAD DE SOBREEXCITACIÓN

Para el ensayo de la unidad de sobreexcitación aplicaremos una subida de tensión a la red en el instante 0 de la simulación hasta 7.5kV. Posteriormente a los 0.8 segundos de la simulación restauraremos la tensión a su valor nominal.

La unidad está preparada para disparar en caso de detectar una excitación superior a 1.1V/Hz con un tiempo de arranque de 20 milisegundos y un tiempo de restablecimiento de 30 milisegundos.

Dado que aplicaremos una tensión de 7.5kV manteniendo la frecuencia constante en 50Hz, se alcanzará una excitación de 1.136 V/Hz. En la primera gráfica de la figura 50 se aprecia la sobretensión aplicada, en la segunda gráfica aparece la perturbación que recibe la unidad de sobreexcitación y por último en la tercera gráfica se observa el disparo.



**Figura 50. Gráfica de disparo de la unidad de sobreexcitación..**





## 10. ENSAYO DE LA UNIDAD DE DISTANCIA

Para el ensayo de la unidad de distancia realizaremos un cortocircuito trifásico según la normativa IEC60909. El cortocircuito se realizará en la línea que alimenta el transformador de la figura 24 (T-HV Cable). Los transformadores de medida de la protección se encuentran en el inicio de la línea previa al transformador. La línea tiene una longitud de 4 kilómetros con unos valores de resistencia y reactancia de secuencia positiva de 0.2 y 0.3 ohmios por kilómetro respectivamente. En todos los casos, la selección de umbrales de disparo en ohmios para ensayar cada zona se ha hecho con objeto de probar la protección pero puede no coincidir con los criterios de ajuste estándares de una protección de distancia que se indican en el apartado de descripción de la protección.

### 10.1. Ensayo de característica MHO

Para este ensayo la protección está configurada con una característica mho y los ajustes para cada zona serán los siguientes:

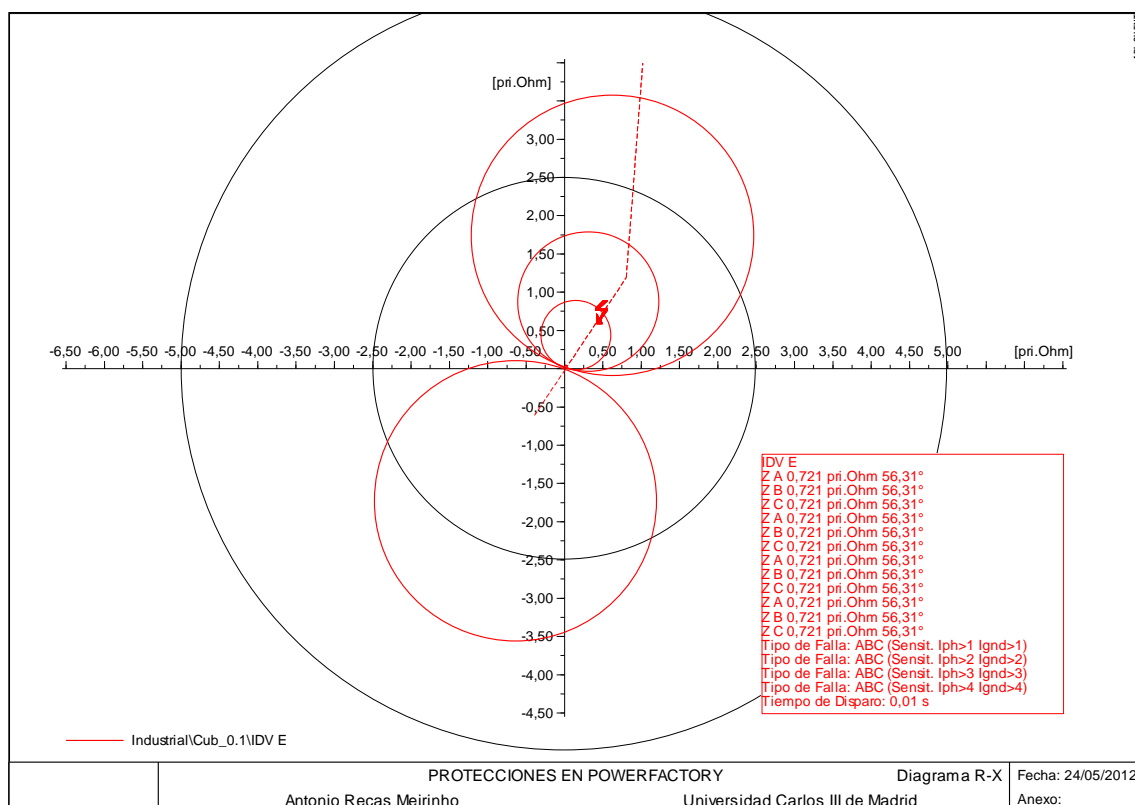
- Zona 1: Tiempo de actuación de 0 milisegundos en caso de detectar una impedancia menor a 1 ohmio secundario. La unidad está configurada para disparar hacia delante.
- Zona 2: Tiempo de actuación de 400 milisegundos en caso de detectar una impedancia inferior a 2 ohmios secundarios. La unidad está configurada para disparar hacia delante.
- Zona 3: Tiempo de actuación de 800 milisegundos en caso de detectar una impedancia inferior a 4 ohmios secundarios. La unidad está configurada para disparar hacia delante.
- Zona 4: Tiempo de actuación de 1.5 segundos con dirección hacia atrás como apoyo. El ajuste de impedancia es de 4 ohmios secundarios.

En todos los casos hay que sumarle al tiempo de actuación un tiempo de arranque de la unidad de 10 milisegundos.

### 10.1.1. Falta en zona uno

Tanto en la leyenda como en el propio diagrama de la figura 51 se puede apreciar la información de la falta detectada.

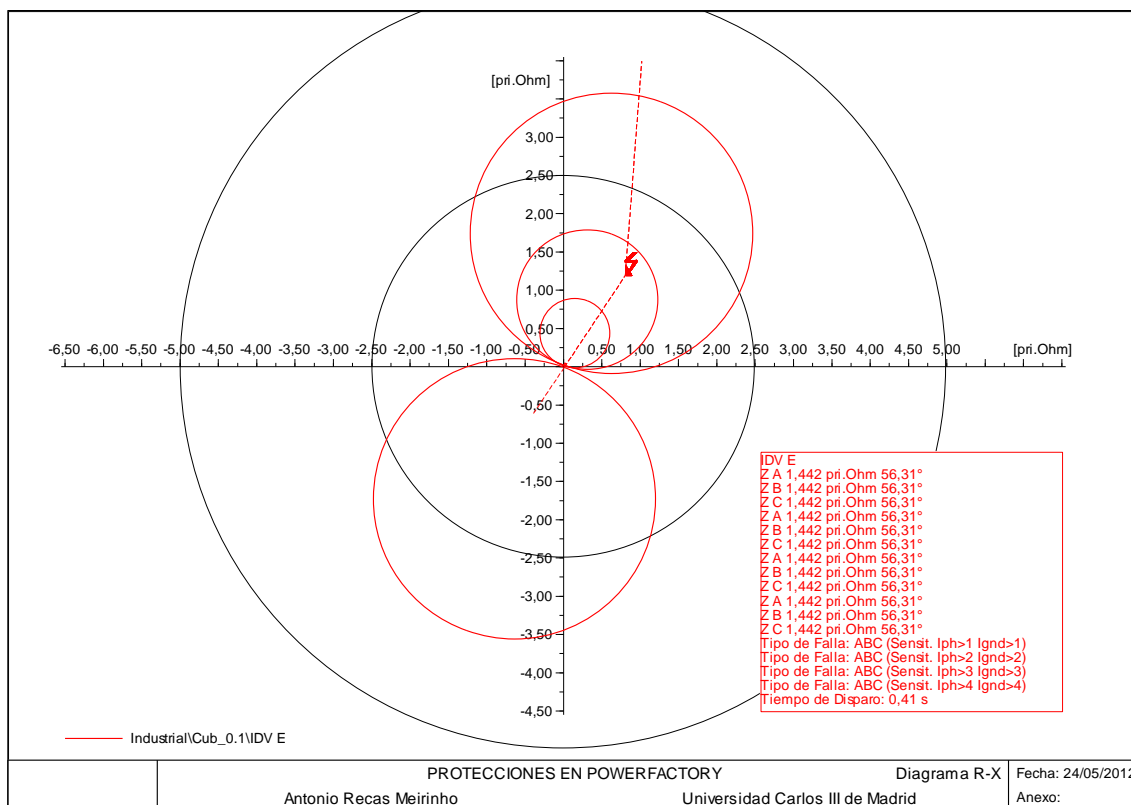
El relé detecta una falta trifásica, lo que es correcto pues hemos realizado un cortocircuito trifásico. Dado que la impedancia que hay hasta la falta es de 0.721 ohmios, ésta se encuentra en zona 1, por lo que la protección dispara en un tiempo instantáneo más los 10 milisegundos que tarda la unidad en arrancar.



**Figura 51. Diagrama R-X de la protección de distancia con característica mho en zona 1.**

### 10.1.2. Falta en zona dos

Las características de este ensayo son idénticas al del apartado 7.1.1 pero en este caso la falta se realizará al 100% de la línea.



**Figura 52. Diagrama R-X de la protección de distancia con característica mho en zona 2.**

En este caso se vuelve a detectar una falta trifásica a una distancia de 1.442 ohmios, por lo que la falta se encuentra en zona 2 y el disparo se produce en un tiempo de 0.41 segundos.

## 10.2. Ensayo de característica cuadrilateral

Para este ensayo la protección está configurada con una característica cuadrilateral y los ajustes para cada zona serán los siguientes:

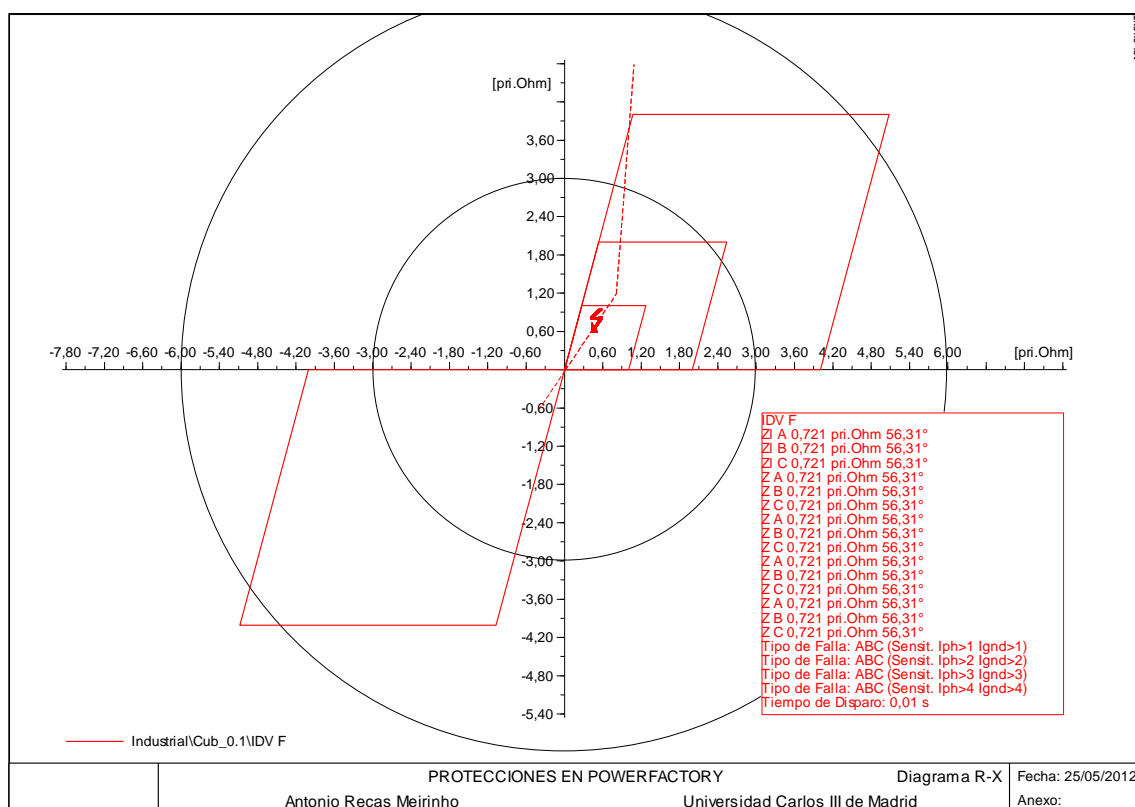
- Zona 1: Tiempo de actuación de 0 milisegundos en caso de detectar una resistencia y reactancia inferior a 1 ohmio secundario. La unidad está configurada para disparar hacia delante.
- Zona 2: Tiempo de actuación de 400 milisegundos en caso de detectar una resistencia y reactancia inferior a 2 ohmios secundarios. La unidad está configurada para disparar hacia delante.
- Zona 3: Tiempo de actuación de 800 milisegundos en caso de detectar una resistencia y reactancia inferior a 4 ohmios secundarios. La unidad está configurada para disparar hacia delante.

- **Zona 4:** Tiempo de actuación de 1.5 segundos con dirección hacia atrás como apoyo. El ajuste de resistencia y reactancia es de 4 ohmios secundarios.

En todos los casos existe un ángulo de  $70^\circ$  y hay que sumarle al tiempo de actuación un tiempo de arranque de la unidad de 10 milisegundos.

### 10.2.1. Falta en zona uno

Las características de este ensayo son idénticas al apartado 7.1.1.

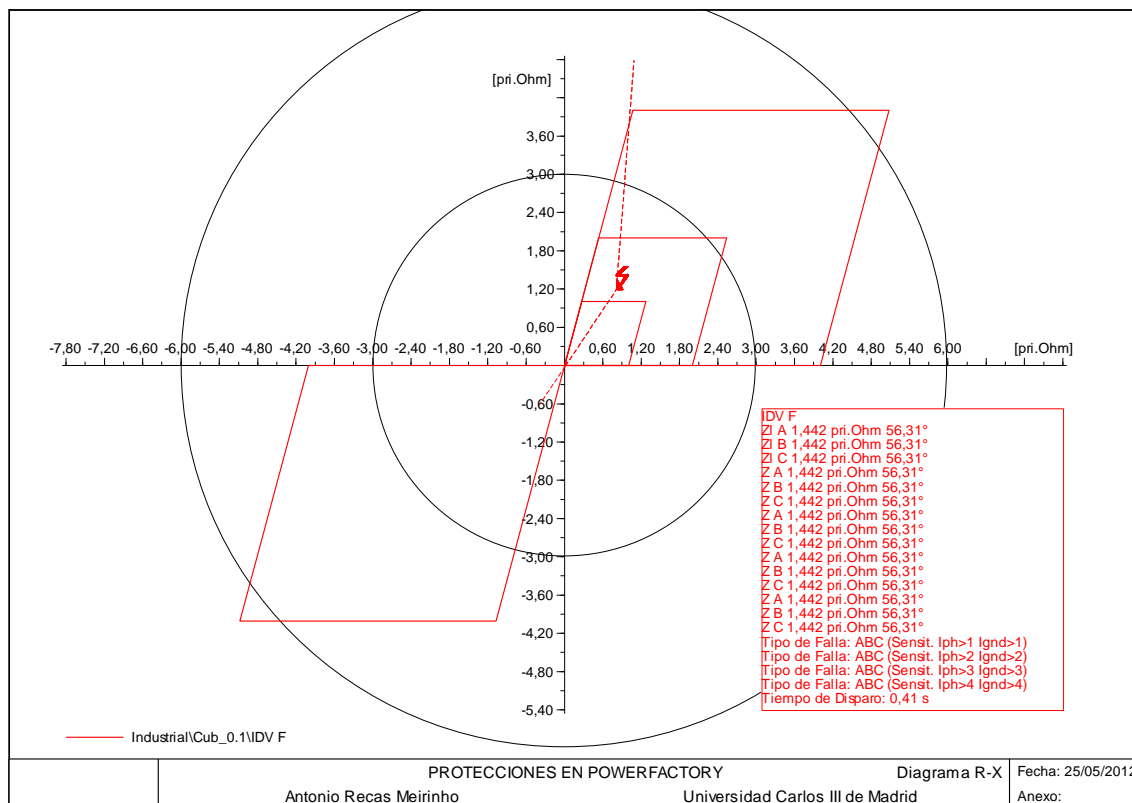


**Figura 53. Diagrama R-X de la protección de distancia con característica cuadrilateral en zona 1.**

Nuevamente se detecta la falta trifásica en zona 1 (0.721 ohmios), por lo que se dispara en un tiempo de 10 milisegundos.

### 10.2.2. Ensayo en zona dos

Las características de este ensayo son idénticas al apartado 7.1.2. En la figura 54 aparece representado el diagrama R-X de la característica cuadrilateral, que detecta una falta trifásica en zona dos (1.442 ohmios) y emite la señal de disparo en 0.41 segundos.



**Figura 54. Diagrama R-X de la protección de distancia con característica cuadrilateral en zona 2.**

## 11. Unidad de fallo de fusible

A continuación comprobaremos el correcto funcionamiento de la unidad de fallo de fusible implementada en los modelos que incluyen protección de distancia. Para el ensayo realizaremos una bajada de tensión en la tensión de la fase C hasta 0V. En estas condiciones, la unidad de fallo de fusible interpreta que el fusible de protección de esta fase se ha fundido con lo cual emite la señal de bloquear la unidad de distancia.

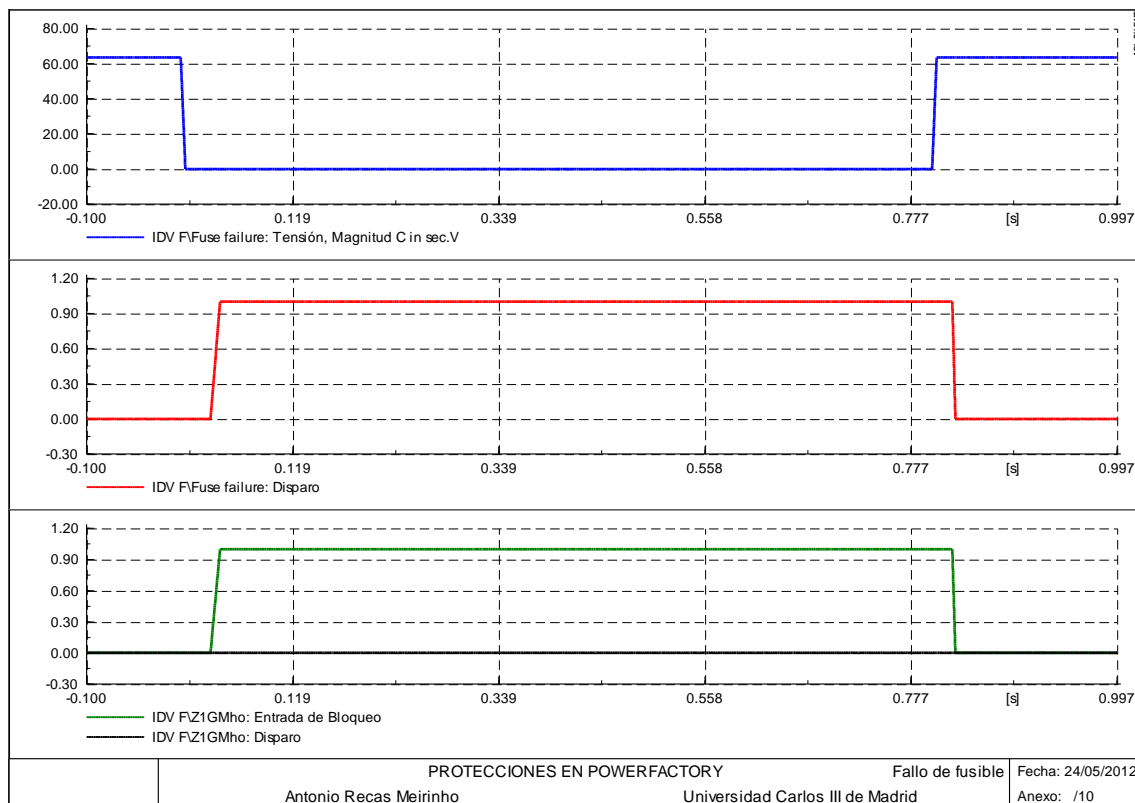
La disminución de tensión se realiza en el instante inicial de la simulación, desde 6.6kV hasta 0V en la fase C, restaurando nuevamente la tensión en el instante 0.8 segundos.

En la figura 55 se aprecian tres gráficas diferentes:

- En la primera gráfica se observa la disminución de tensión producida en la fase C entre los instantes 0 y 0.8 segundos de la simulación.
- En la segunda gráfica aparece la señal de disparo de la unidad de fusible, que se produce 40 milisegundos después de detectar el descenso de la tensión por

debajo de 5V, así como la reposición del disparo 20 milisegundos después de detectar el restablecimiento de la tensión.

- En la última gráfica aparece el estado de la señal de bloqueo de una de las unidades de distancia, que toma los mismos valores que el disparo de la unidad de fallo de fusible.



**Figura 55. Gráfico de la unidad de fallo de fusible.**

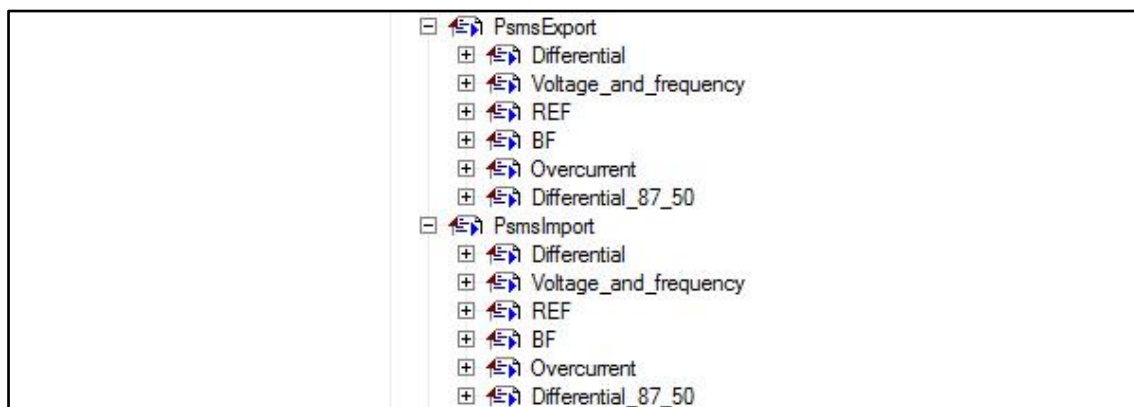
## TRABAJO EN STATIONWARE

Adicionalmente a la primera parte del proyecto, se decidió incorporar los relés a la aplicación StationWare.

StationWare es una base de datos centralizada donde podemos almacenar y registrar todos los ajustes de un relé independientemente del fabricante. El uso de relés de diferentes fabricantes implica la utilización de varias aplicaciones para manejar los ajustes. Con StationWare conseguimos reducir el número de aplicaciones a una sola. A través de esta base de datos podemos tener acceso directo al manual del relé, ajustes, etc.

StationWare permite comunicación en dos sentidos, por una parte nos podemos comunicar con el software de simulación PowerFactory para importar datos o exportarlos, y por otro podemos comunicarnos con el relé importando datos procedentes del relé o exportándolos para cargarlos en el relé. Esto supone que si realizamos una simulación en PowerFactory podríamos exportar los ajustes del relé para posteriormente cargarlos en el relé real. Estas comunicaciones entre ambas aplicaciones se realizan por medio de un conjunto de scripts<sup>7</sup> programados en lenguaje DPL (DigSILENT Programming Language).

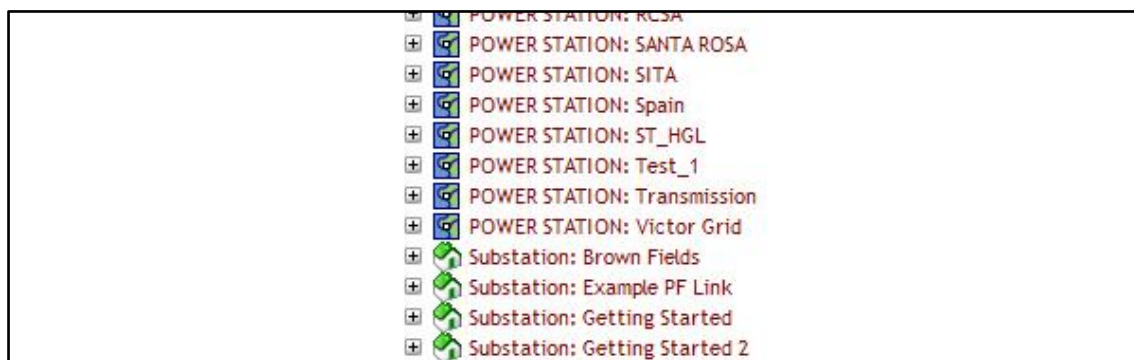
Cabe señalar que la DPL necesaria para exportar los datos es diferente que la que se utiliza para importar. Además, dado que cada relé es diferente, es necesario programar una DPL para cada modelo de relé.



**Figura 56. Estructura de las DPL necesarias para exportar e importar ajustes.**

Para organizar los ajustes en StationWare se pueden crear diferentes centrales eléctricas, subestaciones, etc. de tal manera que podamos tener identificado en cada momento el relé cuyos ajustes estamos modificando.

<sup>7</sup> De aquí en adelante utilizaremos las siglas DPL para referirnos a los scripts programados en este lenguaje y que nos permiten realizar la conexión de forma bidireccional entre PowerFactory y StationWare.



**Figura 57. Lista de centrales eléctricas y subestaciones en StationWare.**

La primera parte del trabajo con la aplicación StationWare ha consistido en desarrollar las DPL necesarias para exportar todos los ajustes de los relés IDN e IDV: intensidades de arranque, alcance de las unidades de distancia, intensidades y voltajes nominales, devanados de referencia, relaciones de transformación de los transformadores de intensidad, ajustes de tiempo, etc.

En segundo lugar ha sido necesario realizar en formato XML las hojas de ajustes de cada modelo necesarias para StationWare, en las cuales se almacenarán los ajustes de los relés IDN e IDV.

Atributo	Descripción	Valor	Rango
<b>General Settings</b>			
Unit_Service	Terminal Unit In Service 0='on' 1='off'	1	0;1
CT_W1	CT Ratio Winding #1 in 1 steps	1	1-3000
CT_W2	CT Ratio Winding #2 in 1 steps	1	1-3000
Ref_Winding	Reference Winding (for metering)	2	1;2
<b>Differential Element</b>			
Diff_enable	Differential Element Enable	0	0;1
TW_1	Tap Winding #1 in 0.01 steps	0,26	0.1-2.5

**Figura 58. Fragmento de la hoja de ajustes de StationWare del relé IDN A.**

El proceso de depuración de las DPL ha sido largo, pues en el caso del relé IDV los ajustes a exportar son muchos, dando lugar a scripts con más de 2000 líneas de código.

A continuación se explica brevemente el proceso realizado para exportar e importar ajustes desde PowerFactory.



## 1. Exportar ajustes a StationWare

Como ya se explicó en la parte de trabajo en PowerFactory, un relé está compuesto por distintos bloques y dentro de estos bloques tenemos los diferentes ajustes que pueden ser exportados.

	Nombre	Tipo	Fuera de Servicio	Object modified	Object modified by	
▶	Z1GMho	Z1GMho	<input type="checkbox"/>	12/05/2012 12:04:55	Administrator	
▶	Z1PMho	Z1PMho	<input type="checkbox"/>	12/05/2012 12:04:55	Administrator	
▶	Z2GMho	Z2GMho	<input type="checkbox"/>	12/05/2012 12:04:55	Administrator	
▶	Z2PMho	Z2PMho	<input type="checkbox"/>	12/05/2012 12:04:55	Administrator	
▶	Z3GMho	Z3GMho	<input type="checkbox"/>	12/05/2012 12:04:55	Administrator	
▶	Z3PMho	Z3PMho	<input type="checkbox"/>	12/05/2012 12:04:55	Administrator	
▶	Z4GMho	Z4GMho	<input type="checkbox"/>	12/05/2012 12:04:55	Administrator	
▶	Z4PMho	Z4PMho	<input type="checkbox"/>	12/05/2012 12:04:55	Administrator	
▶	Z1G	Z1G	<input type="checkbox"/>	12/05/2012 12:04:55	Administrator	
▶	Z1P	Z1P	<input type="checkbox"/>	12/05/2012 12:04:55	Administrator	

Figura 59. Imagen de los diferentes bloques de un relé en PowerFactory.

El proceso que realiza la DPL para exportar los datos es el siguiente:

- En primer lugar seleccionamos el relé desde el cual se quieren exportar los ajustes.
- En segundo lugar debemos seleccionar el bloque en el que se encuentran los ajustes que queremos exportar.
- Por último hay que seleccionar el parámetro que representa al ajuste y lo guardamos en una variable que posteriormente se envía a StationWare.

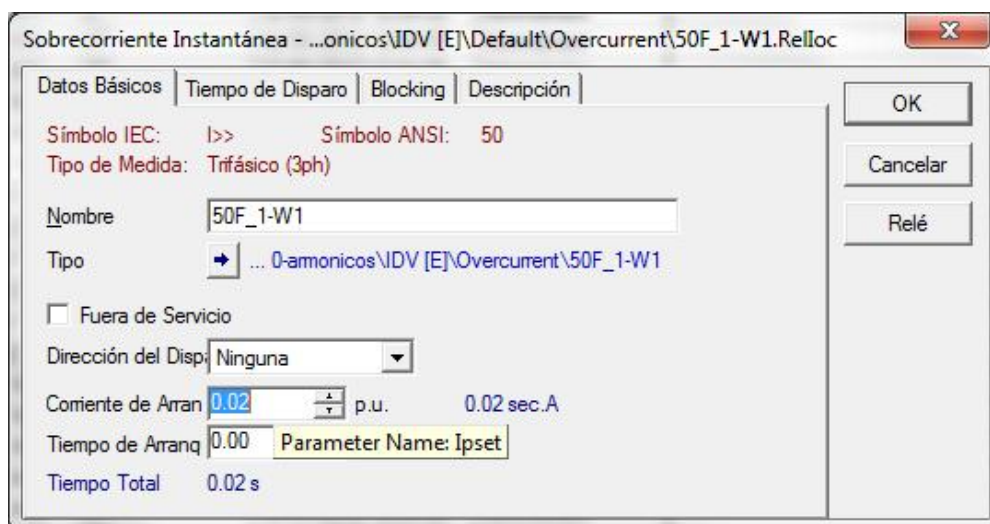


Figura 60. Nombre del parámetro que identifica el ajuste de un relé de sobreintensidad.

El proceso puede parecer algo sencillo, pero en algunos casos el volumen de datos a exportar puede ser demasiado grande, mientras que en otros como es el caso de la figura 60, tan solo tendremos que exportar dos ajustes.

A la vez que se van obteniendo los ajustes y almacenándolos en variables, se van realizando diferentes comprobaciones. Dado que en algunas ocasiones se dispone de varias unidades del mismo tipo y sólo existe un ajuste para todas, se han tenido que



realizar comparaciones y programar mensajes de errores para avisar cuando el ajuste de todas las unidades no sea el mismo. Estos mensajes de error se han programado en varias unidades como pueden ser los bloques RelCtadapt que nos permite seleccionar el devanado de referencia. Si no hay un devanado de referencia seleccionado nos lo indicará en la ventana de salida del programa una vez que se ha detenido la ejecución de la DPL:

```
DigSI/info - Exportar '\\Demo\\StationWare IDN\\Network Model\\Network Data\\Red\\Terminal 1\\Cub_1\\IDN A.ElmsRelay'  
DigSI/info - DPL Programa 'PsmsExport' iniciado  
DigSI/err - Reference winding not selected
```

**Figura 61. Error programado en la DPL de PowerFactory.**

Una vez se ha llevado a cabo la obtención de todos los ajustes y si no se muestra ningún error programado, se pasa a realizar una comprobación para ver si son válidos para ser exportados es decir, se comprueba que los ajustes utilizados en la simulación se encuentran dentro de los rangos de ajuste. Una vez realizada la comprobación se envían todos los ajustes a StationWare.

## **2. Importar ajustes desde StationWare**

El proceso para importar ajustes desde StationWare es muy parecido pero se realiza de forma inversa:

- Primero se selecciona el dispositivo de StationWare desde el que se quieren importar los ajustes.
- En segundo lugar se selecciona el relé de PowerFactory al que se quieren importar los ajustes.
- Finalmente antes de aplicar los ajustes al relé, se realiza una comprobación para ver si se encuentran dentro de los rangos asignados.

Hay que señalar que no se importan todos los ajustes que aparecen en la hoja de ajustes, sólo se importan aquellos que influyen en las simulaciones (ajustes de fechas, horas, etc. no son importados). En este caso los únicos errores que pueden aparecer son los que indique el programa de forma interna si un ajuste no puede escribirse en la unidad correspondiente.



## PRESUPUESTO

A continuación se detalla el presupuesto<sup>8</sup> del proyecto realizado, para ver una versión más ampliada se recomienda acudir al apartado de anexos.

- Descripción del Proyecto:

- Título: Protecciones eléctricas en DIgSILENT PowerFactory: Modelos de fabricantes españoles (II)
- Duración (meses): 5 MESES
- Tasa de costes indirectos: 15%

- Presupuesto total del proyecto (valores en euros): 36.450€ Treinta y Seis Mil Cuatrocientos Cincuenta.

- Desglose presupuestario (costes directos):

PERSONAL			
Concepto	Dedicación horas/hombre [horas]	Coste [horas]	Coste [Total]
Investigación bibliográfica (Horas Ingeniería Junior - 5 meses 10h/semanales)	50	40	2.000 €
Desarrollo de los relés y DPL (Horas Ingeniería Junior - 5 meses 55h/semanales)	275	40	11.000 €
Simulaciones (Horas Ingeniería Junior - 5 meses 15h/semanales)	75	40	3.000€
Horas supervisión proyecto	110	80	8.800€
Total			24.800 €

Tabla 7. Tabla de costes de personal perteneciente al presupuesto del proyecto

EQUIPOS/SOFTWARES					
Descripción	Coste (Euro)	% Uso dedicado proyecto	Dedicación (meses)	Periodo de depreciación	Coste imputable <sup>d)</sup>
Software PowerFactory de DIgSILENT	250,00 €	80	5	60	17 €
Software StationWare de DIgSILENT	17.500,00 €	20	5	60	292 €
Equipo Portátil	599,00 €	100	5	60	50 €
Total					358 €

Tabla 8. Tabla de costes de equipo y software del proyecto

<sup>8</sup> La plantilla para la realización del proyecto se ha obtenido de la página de la Universidad Carlos III de Madrid. La dirección URL se encuentra en el apartado de bibliografía y otras fuentes documentales.



SUBCONTRATACIÓN DE TAREAS		
Descripción		Coste imputable
		- €
Total		0,00 €

Tabla 9. Tabla de subcontratación de tareas del presupuesto del proyecto

OTROS COSTES DIRECTOS DEL PROYECTO <sup>e)</sup>		
Descripción		Coste imputable
Desplazamientos		100 €
Total		100 €

Tabla 10. Tabla de costes de equipo y software del proyecto

- Resumen de costes:

Presupuesto Costes		
Personal		24.800 €
Amortización		358 €
Subcontratación de tareas		0 €
Costes de funcionamiento		100 €
Costes Indirectos		3.789 €
Total Presupuesto		29.047 €

Tabla 11. Tabla de costes del presupuesto

Presupuesto Costes Totales		
Total Presupuesto		29.047 €
Beneficio Industrial (6%) y Gastos		1.843 €
Subtotal		30.890 €
18% I.V.A		5.560 €
Total Presupuesto Proyecto		36.450 €

Tabla 12. Tabla de costes totales del presupuesto

El presupuesto final del proyecto asciende a un total de: Treinta y seis mil cuatrocientos cincuenta euros.



## CONCLUSIONES

La realización de este proyecto surge de la necesidad de los clientes de la empresa DIgSILENT Ibérica S.L de disponer de relés de fabricantes españoles. Al inicio de este proyecto PowerFactory disponía de una amplísima base de datos de relés de diversos fabricantes: Siemens, Schneider, Schweitzer, Alstom, General Electric, etc. A estos hay que añadir los relés del fabricante español ZIV que se han desarrollado entre diversos proyectos. Con la realización de los relés, tanto en la aplicación PowerFactory como en StationWare, se consigue ampliar un poco más el abanico de posibles clientes.

Este proyecto no solo ha supuesto la ampliación de la base de datos de las aplicaciones de DIgSILENT, en el aspecto personal me ha servido de gran utilidad para adentrarme en el mundo de las protecciones eléctricas y para aprender a manejar un potente software de simulación como es PowerFactory.

En lo referente a las protecciones, este proyecto me ha permitido ampliar los conocimientos adquiridos en asignaturas como *Protecciones eléctricas* de cuarto curso, centrándome en el funcionamiento y operación de diversas protecciones como pueden ser las protecciones de tensión, de frecuencia, de sobreintensidad tanto instantáneas como temporizadas, protecciones direccionales etc. así como entender el funcionamiento interno de un relé en general a través de su lógica.

En cuanto al programa PowerFactory, el desarrollo de los relés me ha permitido obtener unas nociones del lenguaje DSL y DPL. Estos lenguajes no solo se utilizan para programar relés sino que puede utilizarse para elaborar infinidad de modelos eléctricos, simulaciones dinámicas (señales con armónicos, huecos de tensión, etc.), flujos de carga, etc.

Espero que este proyecto sirva en la medida de lo posible a otras personas en el desarrollo de relés en las aplicaciones PowerFactory y StationWare de la empresa DIgSILENT.



## ANEXOS

A continuación se adjunta distintos documentos en formato PDF y su contenido se detalla a continuación.

A modo de ejemplo para poder apreciar mejor la lógica completa de un relé, se adjunta en formato PDF los esquemas de los relés IDV E (Anexo I) e IDN G (Anexo II).

También se adjunta el presupuesto del proyecto en el Anexo III.

### 1. Anexo I (Esquema del relé IDV E)

En el caso de este relé, todas las protecciones se encuentran en diferentes subrelés y por lo tanto en el esquema principal no encontramos unidades de ningún tipo.

- Página 1: Esquema principal (Tamaño A0).
- Página 2: Esquema del subrelé de voltaje y frecuencia (Tamaño A2).
- Página 3: Esquema del subrelé de sobreintensidad (Tamaño A0).
- Página 4: Esquema del subrelé diferencial con frenado (Tamaño A0).
- Página 5: Esquema del subrelé diferencial instantánea (Tamaño A0).
- Página 6: Esquema del subrelé de faltas restringidas a tierra (Tamaño A2).
- Página 7: Esquema del subrelé de fallo de interruptor (Tamaño A4).
- Página 8: Esquema del subrelé de polarización (Tamaño A3).
- Página 9: Esquema de la protección de distancia (Tamaño A1).

### 2. Anexo II (Esquema del relé IDN G)

En el caso de este relé, en el esquema principal encontramos la función principal (protección diferencial) mientras que el resto de funciones se encuentran agrupadas en subrelés.

- Página 1: Esquema principal y protección diferencial con frenado (Tamaño A0).
- Página 2: Esquema de la protección diferencial instantánea (Tamaño A2).
- Página 3: Esquema de la protección de sobreintensidad (Tamaño A3).

### 3. Anexo III (Presupuesto del proyecto)

En el anexo III se presenta en formato Excel el presupuesto del proyecto de forma más detallada que la presentada en este documento.



## OBTENCIÓN DE LA INFORMACIÓN

Para realizar un estudio de protecciones previo al proyecto acudí a los libros citados en [1] y [2]. En ambos libros se puede encontrar una descripción del funcionamiento de las protecciones bastante detallada, que personalmente me fueron de gran utilidad para poder entender mejor el funcionamiento de las protecciones a implementar.

Para la obtención de toda la información sobre las funciones de los relés principalmente se han empleado los manuales de las protecciones desarrollados por el propio fabricante. En ellos se puede encontrar los principios de operación de cada unidad, el número de unidades, etc. El manual de la protección IDV se puede encontrar en [3] y el de la protección IDN en [4]

A lo largo del desarrollo ha sido necesario buscar otras fuentes de información, también de la empresa ZIV, dado que la información que se podía extraer de los manuales no era suficiente o en algunos casos era contradictoria. Para obtener esta información complementaria se decidió emplear las hojas de selección de modelo del fabricante (que vienen incluidas en los manuales de la protección de [3] y [4]), las cuales consisten en un formulario que el comprador debe rellenar a la hora de formalizar la compra del relé y en las que aparece la información detallada de la composición de cada modelo de relé, como pueden ser: el número de modelos disponibles, las funciones de cada modelo, las intensidades nominales disponibles, los modelos especiales existentes, etc.

Además también fue necesario emplear el software de simulación Zivercompluss. Este software de la empresa ZIV se utiliza para modificar los relés físicos y también permite emularlos y generar hojas de ajustes, lo cual supone una fuente de información muy fiable. Pese a no poderse acceder al software sin registro y activación de una cuenta por parte de la empresa ZIV, la información sobre este software se puede encontrar en [5].

Para la información referente a la programación en PowerFactory se ha utilizado el manual de usuario de la versión 14.1. [6]. Las referencias técnicas de los bloques se han obtenido de una base de datos a la que sólo tiene acceso la empresa.

A lo largo de la memoria del proyecto así como en los esquemas de las protecciones se hace a los números de las protecciones según la normativa ANSI. En [7] se puede encontrar un listado completo de los diferentes números y dispositivos a los que representan.

Por último, para la realización del presupuesto del proyecto se ha empleado una plantilla proporcionada por la Universidad Carlos III de Madrid y que se puede encontrar en [9]



## BIBLIOGRAFÍA Y OTRAS FUENTES DOCUMENTALES

- [1] Juan M. Suárez Creo, *Protección de instalaciones y redes eléctricas*, Andavira, 2ª edición, 2001.
- [2] Paulino Montané, *Protecciones en las instalaciones eléctricas: evolución y perspectivas*, Marcombo, 2ª edición, 1993.
- [3] ZIV grid automation, *Protección diferencial, control y medida IDV*, Disponible en: <http://www.gridautomation.ziv.es/ziv/maquinas/IDV.html> Fecha de revisión: 30/12/2011
- [4] ZIV grid automation, *Protección diferencial de máquina IDN*, Disponible en: <http://www.gridautomation.ziv.es/ziv/maquinas/IDN.html> Fecha de revisión: 13/04/2011
- [5] ZIV grid automation, *ZiverComPlus – Communications Program*, Disponible en: [http://www.gridautomation.ziv.es/ziv/software\\_tools.html](http://www.gridautomation.ziv.es/ziv/software_tools.html)
- [6] DIgSILENT PowerFactory version 14.1, *User's Manual Edition 1*.
- [7] Wikipedia, *ANSI Device Numbers*, Disponible en: [http://en.wikipedia.org/wiki/ANSI\\_Device\\_Numbers](http://en.wikipedia.org/wiki/ANSI_Device_Numbers)
- [8] “Corrientes de cortocircuito en sistemas trifásicos de corriente alterna. Parte 4: Ejemplos para el cálculo de corrientes de cortocircuito”. Norma UNE 21239-4 IN (equivalente al Informe Técnico CEI/TR 60909-4:2000)
- [9] Plantilla de presupuesto de proyecto disponible en: [http://www.uc3m.es/portal/page/portal/administracion\\_campus\\_leganes\\_est\\_cg/proyecto\\_fin\\_carrera](http://www.uc3m.es/portal/page/portal/administracion_campus_leganes_est_cg/proyecto_fin_carrera)